

Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки – 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение электроэнергетики и электротехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Электропривод спортивного тренажера

УДК 621.333-047.64:629.3/.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г5Б	Демкин Егор Андреевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Каракулов А.С	К.Т.Н		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян М.В	К.Э.Н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Фех А.И			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника	Тютеева П.В	К.Т.Н		

Результаты обучения по направлению
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Код результата	Результат обучения
Р 1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем.</i>
Р 2	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
Р 3	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты.</i>
Р 4	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния <i>электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
Р 5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
Р 6	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
Р 7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i>
Р 8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
Р 9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
Р 10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
Р 11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
Р 12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики
Направление подготовки – 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Отделение электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) Тютеева П.В.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5Г5Б	Демкину Егору Андреевичу

Тема работы:

Электропривод спортивного тренажера	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 3482/С от 06.05.2019 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<u>Технические данные спортивного тренажера марки Hasttings HastPower Pro</u> 1.Масса нагрузочного стека $m = 86$ кг. 2.Перемещения груза $v = 2$ м/с 3.Длина хода стека $l = 1$ м.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1.Расчет и выбор оборудования системы регулируемого электропривода. 2.Исследование принципа действия синхронного двигателя с постоянными магнитами и его математическое описание. Рассмотрение структурной схемы в неподвижной и вращающейся системах координат.

	3.Синтез параметров регулятора электропривода по методу подчиненного регулирования. 4.Имитационное и экспериментальное моделирование переходных процессов.
Перечень графического материала	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент, к.э.н., Мелик-Гайказян М.В.
Социальная ответственность	Старший преподаватель Фех А.И.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Каракулов А.С.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г5Б	Демкин Егор Андреевич		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики
Направление подготовки – 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Уровень образования – Бакалавр
Отделение электроэнергетики и электротехники
Период выполнения _____ весенний семестр 2018/2019 учебного года

Форма представления работы:

бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
16.04.2019г	Расчет и выбор оборудования системы регулируемого электропривода.	
25.04.2019г	Синхронный двигатель с постоянными магнитами.	
10.05.2019г	Синтез параметров регулятора электропривода.	
15.05.2019г	Моделирование переходных процессов	
20.05.2019г	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
23.05.2019г	Социальная ответственность	
25.05.2019г	Оформление пояснительной записки	

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Каракулов А.С.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Тютёва П.В.	к.т.н.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5Г5Б	Демкину Егору Андреевичу

Школа	Инженерная школа энергетики	Направление	Электроэнергетика и электротехника
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов технического проекта: заработанная плата сотрудников, страховые отчисления, накладные расходы.</i>	Положение об оплате труда в ТПУ.
---	----------------------------------

2. <i>Используемая система налогообложения.</i>	Социальные отчисления: 30,2%.
---	-------------------------------

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала инженерных решений.</i>	Определение ресурсной эффективности.
2. <i>Планирование и формирование графика работ по реализации ТП.</i>	Составление работ и оценка времени их выполнения, Диаграмма Ганта.
3. <i>Формирование сметы.</i>	Группировка затрат по статьям: <ul style="list-style-type: none"> • затраты на заработанную плату; • отчисление во внебюджетные фонды; • накладные расходы.

Перечень графического материала

1. <i>Диаграмма Ганта.</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян Мария Вигеновна	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г5Б	Демкин Егор Андреевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5Г5Б	Демкин Егор Андреевич

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	ОЭЭ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Тема ВКР:

Электропривод спортивного тренажера	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Помещение закрытого типа с естественной вентиляцией воздуха. В помещении присутствует искусственное и естественное освещение. Основное рабочее оборудование – ПЭВМ.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Трудовой кодекс Российской Федерации</p> <p>СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы»</p> <p>ГОСТ 12.1.033-81 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность.</p> <p>ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация»</p>
2. Производственная безопасность: <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных факторов – Обоснование мероприятий по снижению воздействия 	<p>Отклонение показателей микроклимата</p> <p>Повышенный уровень шума</p> <p>Недостаточная освещенность рабочей зоны</p> <p>Электромагнитное излучение</p> <p>Опасность поражения электрическим током</p> <p>Опасность возникновения пожара</p>
3. Экологическая безопасность: <ul style="list-style-type: none"> – Анализ воздействия объекта на окружающую среду 	Отходы, образующиеся при поломке оборудования
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Наиболее типичная ЧС – Пожар.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Фех Алина Ильдаровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г5Б	Демкин Егор Андреевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 82 с., 38 рисунков, 13 таблиц, 16 источников.

Ключевые слова: синхронный электродвигатель с постоянными магнитами, датчик положения, сервоконтроллер, математическая модель, позиционное регулирование, контур тока, контур скорости, контур положения.

Объектом проектирования является спортивный тренажер с электромеханическим нагрузателем на базе синхронного электродвигателя с постоянными магнитами.

Цель работы – проектирование спортивного тренажера с электромеханическим нагрузателем на базе синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, настройка и оптимизация параметров системы регулируемого электропривода.

В процессе проектирования проводился выбор сервоконтроллера и электродвигателя, проведен синтез параметров регулятора, смоделирована система электропривода.

Проведена проверка безопасности и экологичности проекта, также рассчитана экономическая эффективность модернизации оборудования.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2016. Имитационное моделирование выполнено с использованием программ MexBIOS Development Studio и Matlab-Simulink.

Оглавление

Введение	11
1. Расчет и выбор оборудования системы регулируемого электропривода.....	13
1.1 Анализ расчетной схемы механизма.....	13
1.2 Расчет мощности двигателя, выбор двигателя, расчет параметров двигателя.	16
1.3 Расчет диаметра делительной окружности звездочки.....	18
1.4 Выбор сервоконтроллера для системы регулируемого электропривода.	18
1.5 Выбор и обоснование датчика положения	23
1.5.1 Принцип работы резольвера	25
2. СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ	27
2.1 Принцип действия синхронного двигателя с постоянными магнитами	27
2.2 Математическое описание синхронного двигателя с постоянными магнитами.....	29
2.3 Модель синхронной машины в неподвижной системе координат	31
2.4 Модель синхронной машины во вращающейся системе координат	35
3. Синтез параметров регулятора электропривода.....	37
3.1 Синтез регулятора тока.....	39
3.2 Синтез регулятора скорости	41
3.3 Синтез регулятора положения	43
4. Моделирование переходных процессов	44
4.1 Имитационное и экспериментальное моделирование	44
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	54
5.1 Организация работ технического проекта.....	54
5.1.1 Структура работ в рамках технического проектирования.....	54
5.1.2 Определение трудоемкости выполнения технического проекта.....	56
5.1.3 Разработка графика проведения технического проекта.....	58
5.2. Составление сметы затрат на разработку технического проекта.....	61
5.2.1 Расчет материальных затрат	61
5.2.2 Расчет полной заработной платы	61
5.2.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	63
5.2.4 Накладные расходы.....	63

5.3 Формирование сметы затрат технического проекта	63
5.4 Определение ресурсоэффективности работы.....	64
6. Социальная ответственность	67
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	67
6.2 Производственная безопасность.....	69
6.2.1 Отклонение показателей микроклимата	69
6.2.2 Повышенный уровень шума.....	70
6.2.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны.....	71
6.2.4 Электромагнитное излучение.....	71
6.2.5 Опасность поражения электрическим током	72
6.2.6 Опасность возникновения пожара.....	74
6.3 Экологическая безопасность	75
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	76
6.5 Вывод по разделу.....	76
Заключение	79
Список использованных источников.....	80
Приложение А.....	82

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время трудно представить область деятельности, в которой не использовались бы цифровые устройства. В современном мире разработка цифровых систем движется вперед огромными шагами. Их развитие происходит по определенным направлениям, основным из которых следует считать повышение сложности систем. Сложная система должна работать долго и надежно, только в этом случае она экономически целесообразна.

Автоматизированные электроприводы являются главным средством приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса. Основная тенденция развития электропривода заключается в существенном усложнении функций, выполняемых электроприводом, и законов движения рабочих машин при одновременном повышении требований к точности выполняемых операций. Это неизбежно приводит к функциональному и техническому усложнению управляющей части электропривода и закономерно вызывает использование в ней средств цифровой вычислительной техники, что стимулирует развитие микропроцессорных регуляторов и средств их автоматизированного проектирования.

В данной ВКР проектируется электропривод спортивного тренажера. Целью данного проекта является расширение функциональных возможностей спортивной установки с помощью возможностей автоматизированного электропривода. Главными преимуществами таких установок являются: сбор информации о физическом состоянии и активности пользователя, управление режимами работ и задающими воздействиями с помощью вспомогательных цифровых устройств. Учет индивидуальных особенностей спортсмена достигается путем проведения занятия по круговой тренировке на тренажере, результаты которой анализируются. По результатам анализа система сама

предлагает пользователям упражнения для проработки отстающих групп мышц и ведет при этом статистику физических показателей.

Такие типы спортивных тренажеров оптимальны для задания дозированных нагрузок в периоды реабилитации людей, перенесших тяжелые заболевания, и для укрепления мышц опорно-двигательного аппарата, а также представителей бодибилдинга.

1. РАСЧЁТ И ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

1.1. Анализ расчетной схемы механизма

За основу был взят тренажер - мультистанция Hastings HastPower Pro (рисунок 1) с массой стека $m=86$ кг, длиной хода стека $l=1$ м и скоростью перемещения груза $v=2$ м/с.

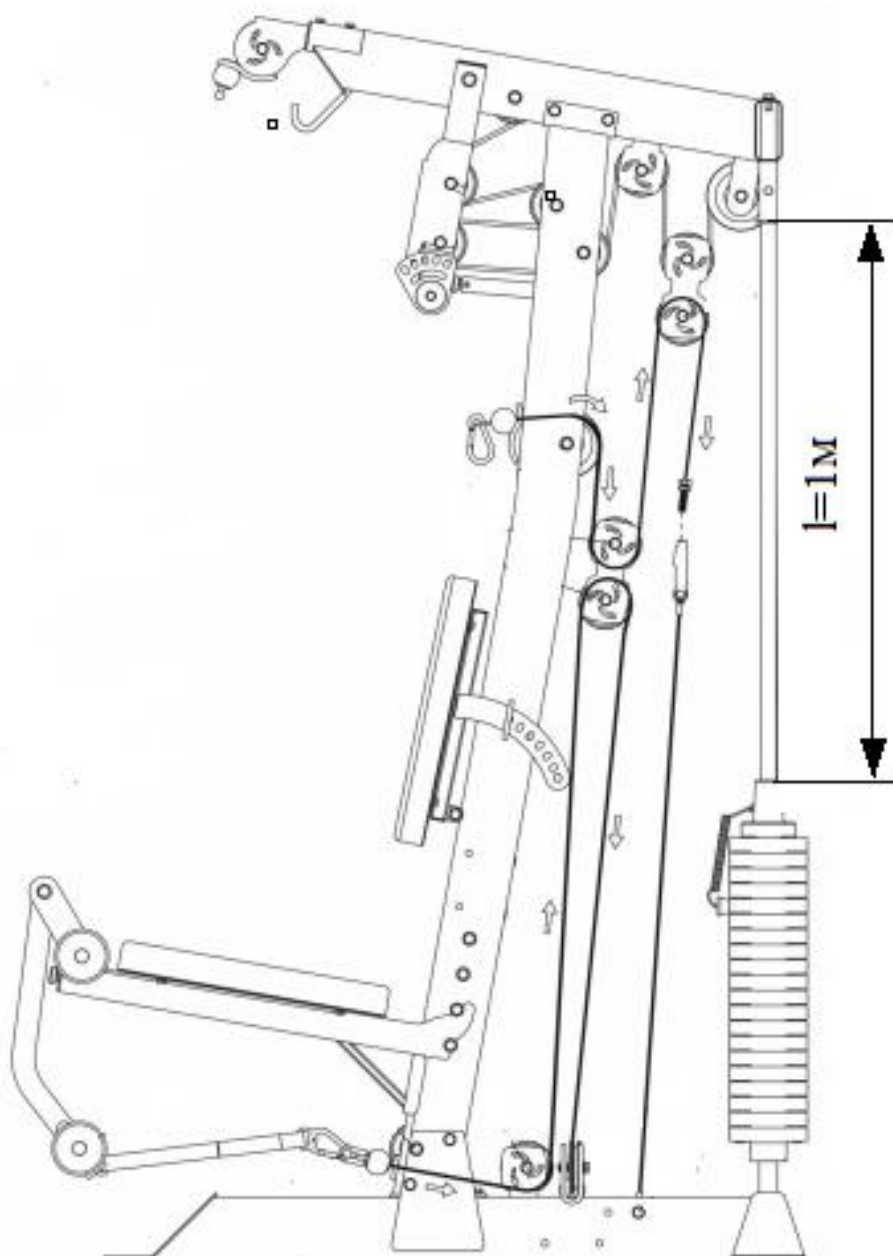


Рисунок 1 – Мультистанция Hastings HastPower Pro

Нагрузочный стек был заменен электромеханическим нагрузателем на базе синхронного электродвигателя с постоянными магнитами (рисунок 2).

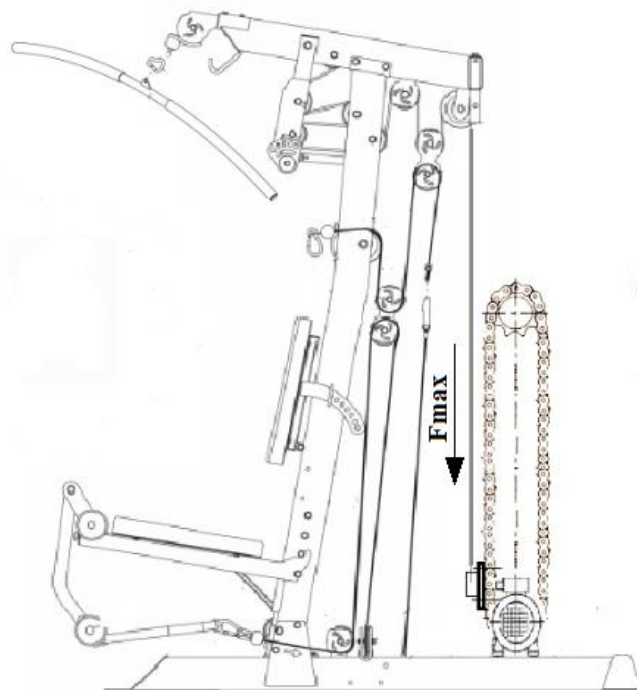


Рисунок 2 — Мультистанция Hastings HastPower Pro с электромеханическим нагрузателем на базе синхронного электродвигателя с постоянными магнитами.

Кинематическая схема механизма представлена на рисунке 3.

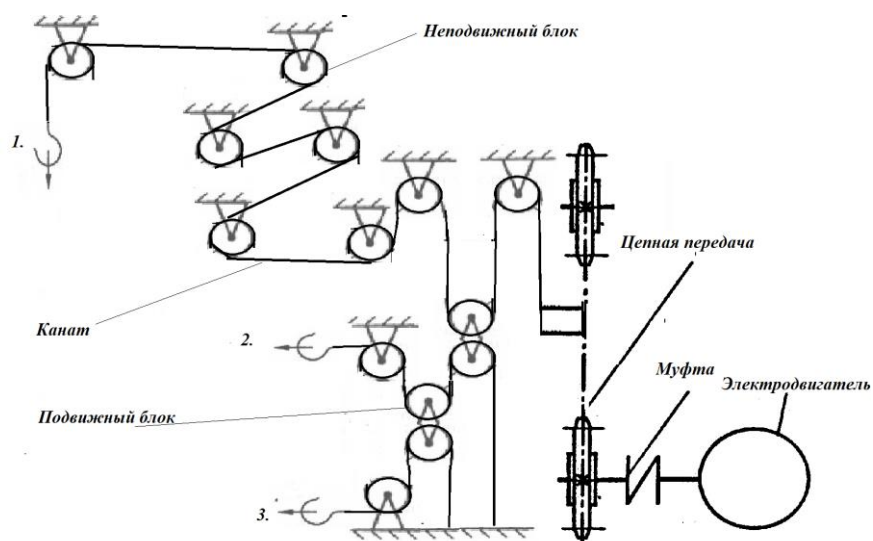


Рисунок 3 — Кинематическая схема.

По кинематической схеме видно, что механизм имеет три точки приложения силы, рассмотрим распределение приложенной силы для второй точки без учета сил трения качения и абсолютно упругим канатом, для остальных точек распределение силы будет аналогичным.

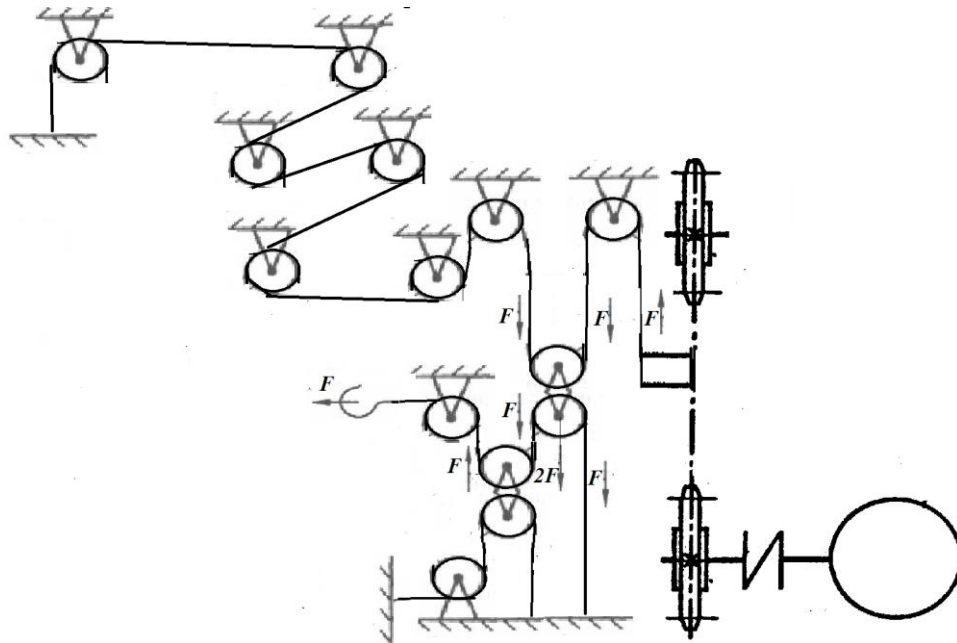


Рисунок 4 – Рассмотрение распределения приложенной силы для второй точки.

По рисунку 4 можно сделать вывод, что коэффициент передачи силы у механизма равен единице.

Зависимость линейной скорости перемещения груза от частоты вращения вала двигателя описывается следующей формулой:

$$v_{\text{перем}} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}, \text{ м/с}$$

где D — делительный диаметр окружности звездочки, м;

n — частота вращения вала двигателя, об/мин.

Момент нагрузки создаваемый на валу при приложении усилия к любой точке приложения силы спортивного тренажера:

$$M_c = \frac{F_{\text{усилия}} \cdot D}{2}, \text{ Нм}$$

где $F_{\text{усилия}}$ — усилие прилагаемое к любой точке приложения силы, Н;

1.2. Расчёт мощности двигателя, выбор двигателя, расчет параметров двигателя

По формуле определяется необходимая расчетная мощность, для дальнейшего выбора двигателя:

$$P_{\text{дв.расч}} = K_3 \cdot \frac{F_{\text{max}} \cdot v}{\eta_{\text{п}}} = K_3 \cdot \frac{m \cdot g \cdot v}{\eta_{\text{п}}} =$$

$$= 1,1 \cdot \frac{86 \cdot 9,81 \cdot 2}{0,92} = 2017,5 \text{ Вт}$$

где K_3 – коэффициент запаса;

m – масса стека, кг;

v – скорость перемещения груза, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи;

Двигатель выбираем из условия : $P_{\text{н.дв}} \geq P_{\text{дв.расч}}$.

Из каталога [1] выбран синхронный двигатель с постоянными магнитами ДСМ71 имеющий параметры, представленные в табл. 1

Таблица 1 – Технические характеристики выбранного двигателя ДСМ71

Заданные величины	Условное обозначение	Единица измерения	Численное значение
Фазное напряжение	$U_{\text{ф}}$	В	220
Линейное напряжение	$U_{\text{л}}$	В	380
Номинальный ток статора	$I_{\text{н}}$	А	11.5
Сопротивление статора	$R_{\text{с}}$	Ом	4.7
Мощность двигателя	$P_{\text{дв}}$	Вт	2200
КПД	$\eta_{\text{н}}$	%	90

Продолжение таблицы 1.

Синхронная частота вращения	n_c	об/мин	375
Коэффициент мощности	$\cos\varphi_H$	о.е.	0,87
Число пар полюсов	p	-	8
Момент инерции	J	кг · м ²	0.0055

Синхронная угловая скорость двигателя:

$$\omega_{\text{дв.с}} = \frac{\pi \cdot n_c}{30} = \frac{3.14 \cdot 375}{30} = 39.25 \text{ рад/с}$$

где n_c – синхронная скорость вращения двигателя, об/мин;

Номинальный момент:

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.}}}{\omega_{\text{дв.с}}} = \frac{2200}{39,25} = 56 \text{ Нм}$$

$P_{\text{дв.}}$ – мощность двигателя, Вт;

Индуктивность статора:

$$L_s = 0.3 \cdot \frac{U_\phi}{I_H \cdot \rho \cdot \omega_{\text{дв.с}}} = 0.3 \cdot \frac{220}{11.5 \cdot 8 \cdot 39.25} = 0.019 \text{ Гн}$$

U_ϕ – фазное напряжение двигателя, В;

I_H – номинальный ток статора, А;

ρ – количество пар полюсов двигателя;

Максимальный допустимый ток двигателя:

$$I_{\text{max}} = k_{\text{пер}} \cdot I_{\text{дв.н}} = 3 \cdot 11.5 = 34.5 \text{ А.}$$

$k_{\text{пер}} = 3$ – коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току.

1.3. Расчёт диаметра делительной окружности звездочки.

По формуле определяется диаметр делительной окружности звездочки:

$$D = \frac{60 \cdot v}{n_c \cdot \pi} = \frac{60 \cdot 2}{375 \cdot 3.14} \approx 0.1 \text{ м}$$

Где v – скорость перемещения груза, м/с;

n_c – синхронная скорость вращения двигателя;

1.4. Выбор сервоконтроллера для системы регулируемого электропривода

Выбираем сервоконтроллер при условии:

$$I_H \geq I_{H, \text{дв.}}, P_H \geq P_{H, \text{дв.}}$$

Из каталога [2] выбран сервоконтроллер mUSD-220 (рисунок 5) имеющий параметры, представленные в таблице 2, и функции, представленные в таблице 3.

Сервоконтроллер mUSD содержит все необходимые функции управления для основных типов электродвигателей, и позволяет формировать необходимые траектории перемещений, выполнение ограничений на максимальный ток и скорость, отслеживать аварийные ситуации. За счет параметров настроек возможно быстро адаптировать сервоконтроллер для задач пользователей.

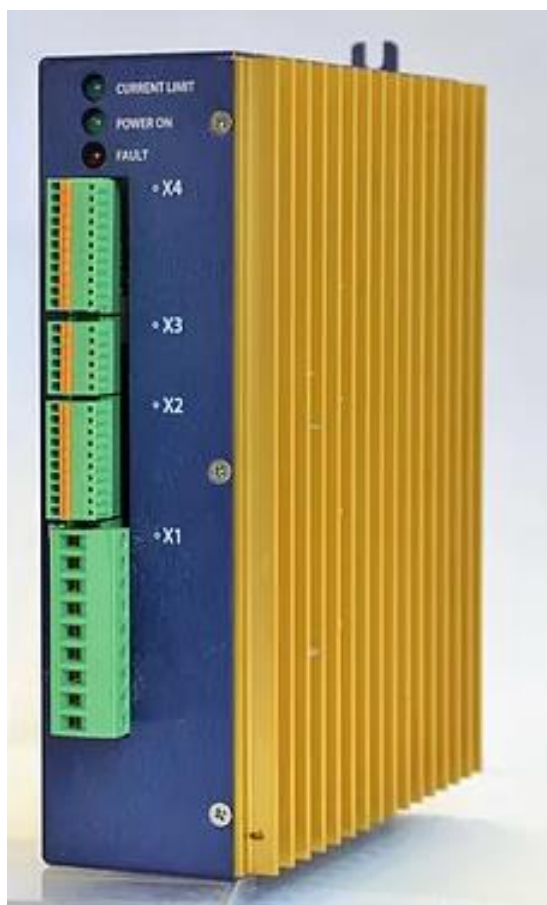


Рисунок 5 - Сервоконтроллер mUSD-220.

Таблица 2 – Технические характеристики сервоконтроллера mUSD-220

Заданные величины	Условное обозначение	Единица измерения	Численное значение
Номинальное напряжение питания	U_{ϕ}	В	220
Напряжение питания цепей управления	U	В	24
Максимальный выходной ток	I_{\max}	А	30
Номинальный выходной ток	$I_{\text{н}}$	А	15
Мощность подключаемого электродвигателя	$P_{\text{дв.}}$	Вт	2200

Продолжение таблицы 2.

Частота переключения ключей	$f_{\text{пер}}$	кГц	6
Частота выполнения расчетов в контуре тока	$f_{\text{вычисл.}}$	кГц	6
Габариты	ДхШхВ	мм	202x170x55
Масса	m	кг	1

Таблица 3 – Функции управления и защиты сервоконтроллера mUSD-220

Режимы управления	Управление скоростью, положением, крутящим моментом
Сигналы задания	Последовательный интерфейс, аналоговый и дискретный интерфейс, встроенная таблица «индексера», встроенная система исполнения программ пользователя
Встроенный контроллер программ пользователя	Осуществляет выполнение программ пользователя («встроенный ПЛК»), за счет чего возможно настроить гибко логику работы устройства, полностью адаптировав к требованиям и алгоритмам обслуживаемого технологического процесса
Внешний тормозной резистор	Присутствует разъем для подключения внешнего тормозного резистора. Контроллер отслеживает количество энергии, выделяемой на резисторе для исключения его перегрева.

Автоматическая настройка датчика положения	Устанавливает параметры, синхронизирующие датчик положения с реальным положением ротора для достижения максимального крутящего момента
Профили ускорения/торможения	Формируют законы разгона и торможения для достижения плавного хода механизмов. Возможны линейный, S-образный законы с ограничением максимальной скорости, ускорения и рывка.
Защиты	Превышение тока, перегрев контроллера, превышение или понижение силового напряжения ниже заданного уровня, перегрев тормозного резистора, превышение величины рассогласования при отработке положения, обрыв датчиков положения. Возможны режимы сброса аварий: Авто, Ручное, по пересбросу питания
Сигналы задания	Фиксирует основные события и аварийные ситуации, с меткой времени, с сохранением в энергонезависимую память

Полная схема подключения сервоконтроллера mUSD-220 приведена в приложении А.

Силовая часть схемы представлена на рисунке 6.

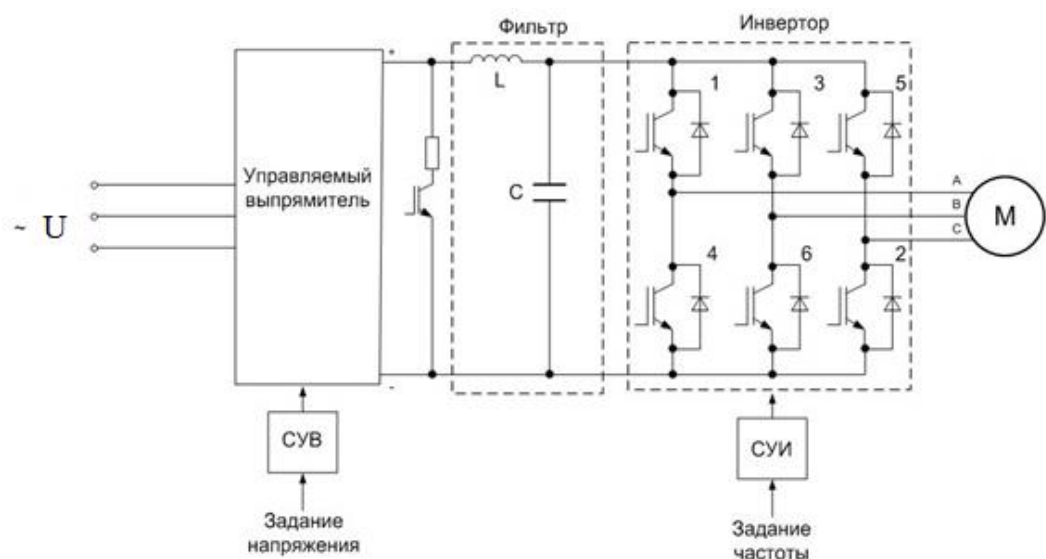


Рисунок 6 - Силовая часть схемы сервоконтроллера

Описание подключения:

Разъем X1 предназначен для подключения силовых проводников:

- питания
- фаз двигателя
- резистора рассеивания энергии торможения

X1	Сигнал	Описание
1	PE	"Земля"
2	A	Фаза питания 1
3	B	Фаза питания 2
4	C	Фаза питания 3
5	U	Фаза двигателя 1
6	V	Фаза двигателя 2
7	W	Фаза двигателя 3
8	+	Шина звена постоянного тока +
9	-	Шина звена постоянного тока -

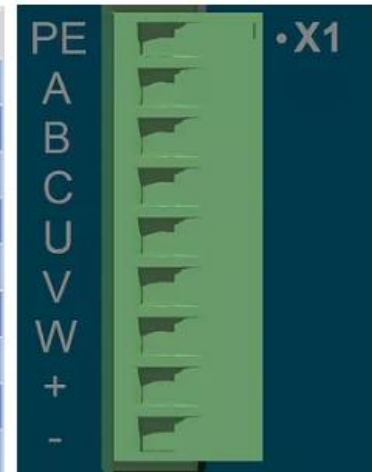


Рисунок 7- Разъем X1

Разъемы X2 и X3 предназначены для подключения сигналов аналогового и дискретного интерфейса: дифференциального аналогового входа, сигнала тахогенератора, дискретных входов и выходов, аналогового выхода, а также цепей питания данных интерфейсов.

X2	Сигнал	Описание
1	Dout1	Дискретный выход 1
2	Analog-In1-	Вход аналоговый дифференциальный -
3	Analog-In1+	Вход аналоговый дифференциальный +
4	GND	Общий для дискретных входов
5	Din5	Дискретный вход 5
6	Dout2	Дискретный выход 2
7	Dout3	Дискретный выход 3
8	Dout4	Дискретный выход 4
9	Analog Out	Аналоговый выход
10	Tacho In	Вход сигнала тахометра

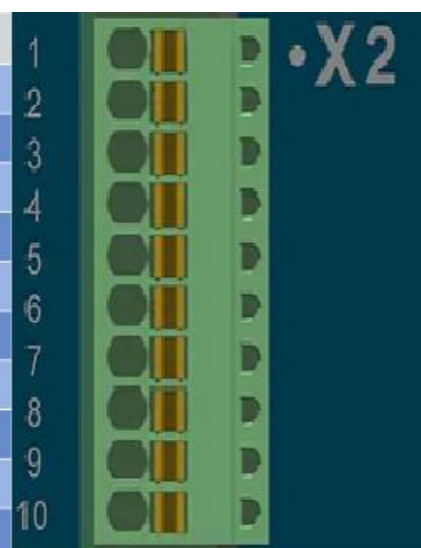


Рисунок 8 - Разъем X2

ХЗ	Сигнал	Описание
1	Din1	Дискретный вход 1
2	Din2	Дискретный вход 2
3	+5Vdc	+5V(50mA) Питание
4	Din3	Дискретный вход 3
5	Gnd	Общий для дискретных входов
6	Din4	Дискретный вход 4/Счетный вход

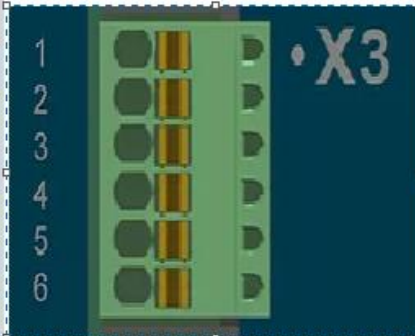


Рисунок 9 - Разъем ХЗ

Разъем Х4 предназначен для подключения датчиков положения вала двигателя. Возможно подключение как резольвера, так и оптического энкодера со встроенными тремя датчиками Холла для определения текущей позиции вала двигателя на момент подачи питания на сервоконтроллер.

Пин	Сигнал	Энкодер/датчики Холла	Резольвер
1	A/Sin	+A вход	+Sin
2	Hall1	Hall1 вход	-
3	-A/Sin	-A вход	-Sin
4	Hall2	Hall2 вход	-
5	B/Cos	+B вход	+Cos
6	Hall3	Hall3 вход	-
7	-B/Cos	-B вход	-Cos
8	+5Vdc	+5V питание	-
9	Z/Gen	+Z вход	+ Возбуждение
10	Gnd	Общий	Общий (для оплетки кабеля)
11	-Z/Gen	-Z вход	- Возбуждение

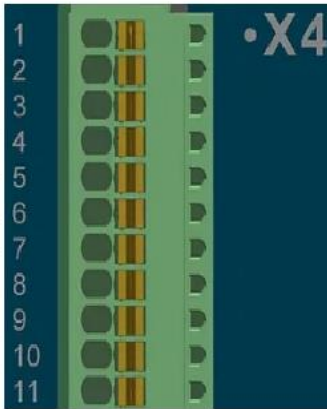


Рисунок 10 - Разъем Х4

1.5. Выбор и обоснование датчика положения

Датчик – это устройство, обеспечивающее функциональное преобразование одной величины в другую величину, участвующую в некотором информационном процессе. Датчики углового и линейного

перемещений всегда составляли основу информационного обеспечения робототехнических и мехатронных систем [3].

Датчики обратной связи предназначены для контроля измеряемых координат объекта регулирования и выдачи соответствующей информации в блок памяти или в сравнивающее устройство системы управления. Тип датчиков обратной связи определяется видом используемой в них системы управления.

В качестве датчика обратной связи был выбран резольвер. Данный тип датчиков выдерживает большие нагрузки, включая вибрационное воздействие, и обладает широким диапазоном рабочих температур.

Резольвер - электрическая микромашинка переменного тока предназначенная для преобразования угла поворота в электрическое напряжение, амплитуда которого пропорциональна или является функцией (чаще всего, синус или косинус) угла или самому углу.

Резольверы применяются в аналого-цифровых преобразователях, системах передачи угла высокой точности, в качестве датчиков обратной связи в следящих системах, бортовой аппаратуре.

Схема подключения резольвера представлена на рисунке 11.

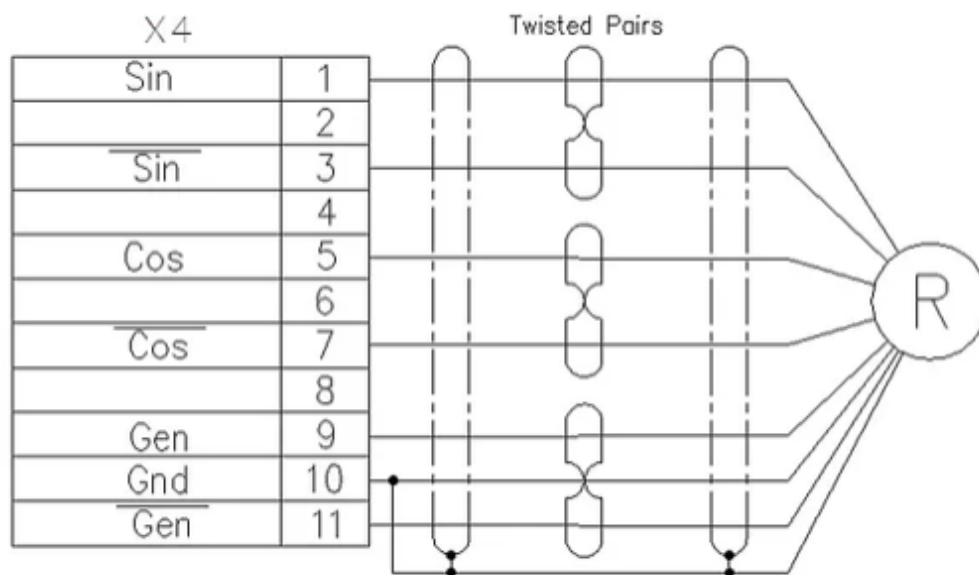


Рисунок 11 – Схема подключения резольвера.

1.5.1. Принцип работы резольвера

Конструктивно резольвер выполнен подобно асинхронному двигателю с фазным ротором, статор представляет собой многополюсный сердечник из листов электротехнической стали или пермаллоя. В пазах ротора проложены две распределенных обмотки, сдвинутые на 90° одна относительно другой. Обмотки ротора имеют одинаковое число витков и активные сопротивления [4].

На рис. 10 $R_1 - R_2$ обмотка статора, а $S_2 - S_4$, $S_1 - S_3$ – синусной и косинусной обмотками ротора.

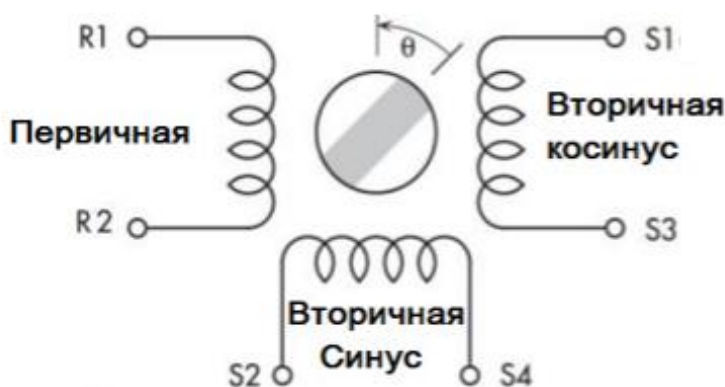


Рисунок 12 – Схема обмоток резольвера.

Закон изменения напряжения на вторичных обмотках (рисунок 11) описывается уравнениями:

$$U_{(S_1-S_3)} = U_{(R_1-R_2)} \cdot K_{\text{тр}} \cdot \cos(\theta),$$

$$U_{(S_2-S_4)} = U_{(R_1-R_2)} \cdot K_{\text{тр}} \cdot \sin(\theta)$$

где, $K_{\text{тр}}$ – коэффициент трансформации;

$U_{(R_1-R_2)}$ – напряжение на обмотке статора, В;

$U_{(S_1-S_3)}$ – напряжение на косинусной обмотке ротора, В;

$U_{(S_2-S_4)}$ – напряжение на синусной обмотке ротора, В;

θ – угол поворота ротора, град.;

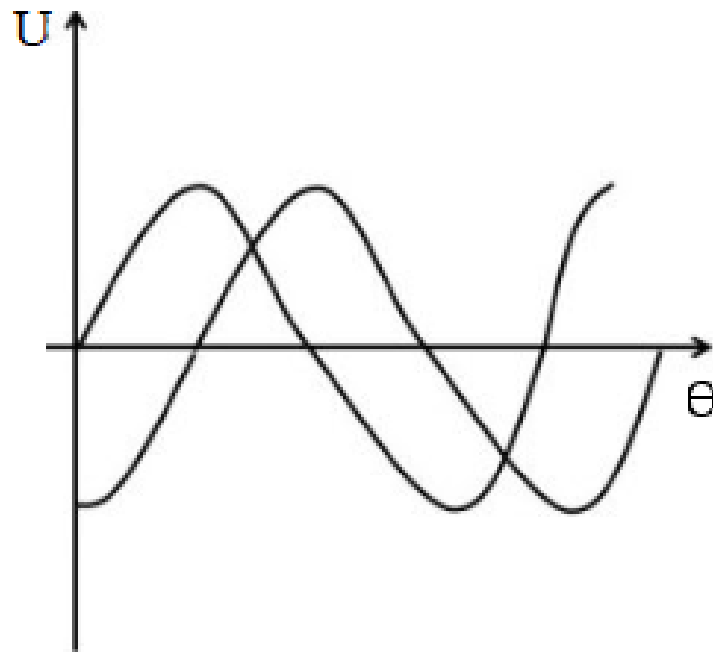


Рисунок 13 – Изменение напряжения на вторичных обмотках резольвера при изменении угла поворота ротора электродвигателя.

2. СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

2.1. Принцип действия синхронного двигателя с постоянными магнитами

Принцип действия синхронного двигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с магнитным полем полюсов ротора.

Трехфазный переменный ток создает в обмотке статора вращающееся магнитное поле, которое вращается в пространстве со скоростью [5]:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

где f — частота переменного тока. Гц;

p — число пар полюсов в машине;

Представим себе магнитное поле статора в виде круга с явно выраженными полюсами на нем, вращающегося со скоростью n об/мин. Эти полюса магнитными силовыми линиями связываются с полюсами ротора противоположной полярности (рисунок 14,а).

Вращающееся магнитное поле увлекает за собой полюса ротора и заставляет их вращаться с такой же скоростью. Скорость вращения ротора, равную скорости вращающегося магнитного поля, называют синхронной скоростью. При нагрузке ротор синхронного двигателя отстает на некоторый угол θ от вращающегося магнитного поля, причем с увеличением нагрузки угол θ увеличивается (рисунок 14,б)

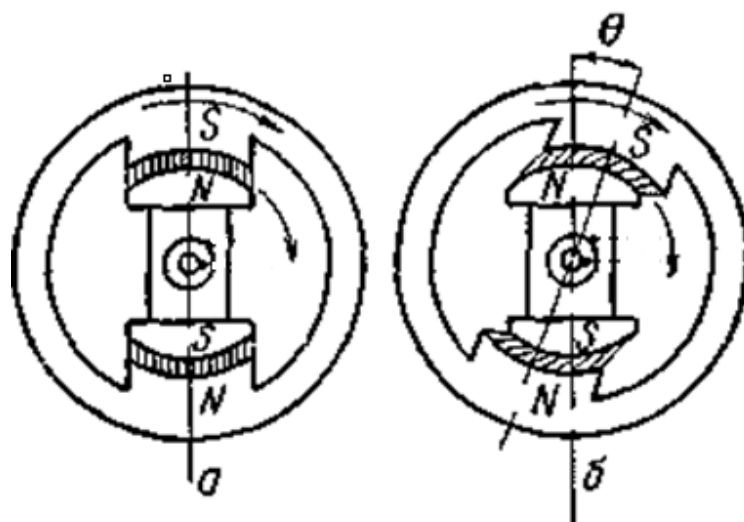


Рисунок 14 – Принцип действия синхронного двигателя:

а – при холостом ходе, б – при нагрузке.

Зависимость вращающего момента синхронной машины от угла θ представлена на рисунке 15. Кривая имеет вид синусоиды. При номинальной мощности двигателя угол $\theta = 20 - 30^\circ$, при этом перегрузочная способность двигателя равна:

$$\frac{M_{\text{макс}}}{M_H} = 2 \div 3$$

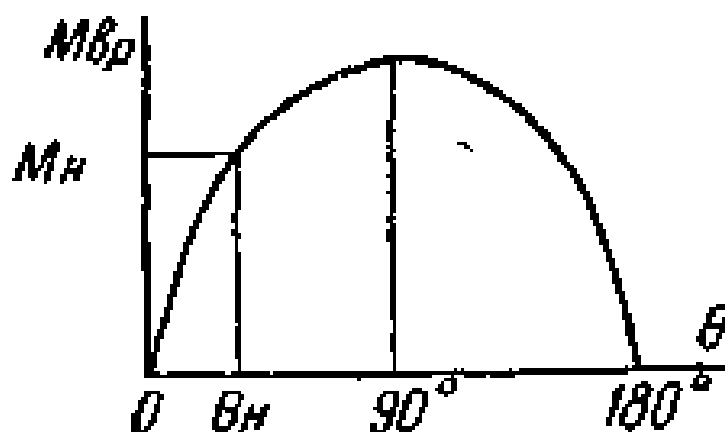


Рисунок 15 – Угловая характеристика синхронного двигателя.

Вращающий момент синхронного двигателя пропорционален приложенному напряжению. Ротор вращается с синхронной скоростью, не зависящей от нагрузки, а при увеличении нагрузки изменяется только угол θ

2.2. Математическое описание синхронного двигателя с постоянными магнитами

Рассмотрим физическую модель синхронной машины с постоянными магнитами, которая показана на рисунке 16.

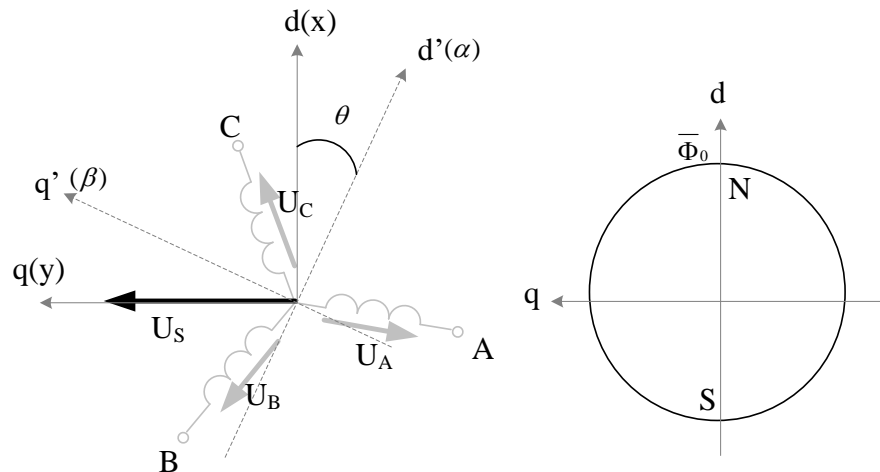


Рисунок 16 – Физическая модель синхронной машины с постоянными магнитами

На этом рисунке приняты следующие обозначения:

$\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$ – вектора фазных напряжений

\bar{U}_s – пространственный вектор напряжения

$\bar{\Phi}_0$ – пространственный вектор магнитного потока ротора (машина с возбуждением от постоянных магнитов)

$d'q'(\alpha\beta)$ – неподвижная система координат

$dq(xy)$ – вращающаяся система координат

При построении математической модели двигателя примем следующие допущения:

- отсутствуют насыщение магнитной цепи, потери в стали и эффект вытеснения тока;
- обмотки статора симметричны;

- индуктивность рассеяния не зависит от положения ротора в пространстве;
- отсутствует вязкое трение в подшипниках ротора.

С учетом этих допущений уравнения равновесия ЭДС на обмотках статора в неподвижной системе координат, базирующиеся на втором законе Кирхгофа (ротор не имеет обмоток) запишутся в виде.

$$\begin{cases} U_A = R_A \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt}, \\ U_B = R_B \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt}, \\ U_C = R_C \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt}. \end{cases} \quad (1)$$

где, для машины с возбуждением от постоянных магнитов

$$\begin{cases} \Psi_A = L_A \cdot i_A + \Phi_0 \cdot \cos(\omega \cdot t), \\ \Psi_B = L_B \cdot i_B + \Phi_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - 120^\circ), \\ \Psi_C = L_C \cdot i_C + \Phi_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + 120^\circ). \end{cases}$$

$\Phi_0 = \text{const}$ – магнитный поток создаваемый постоянными магнитами статора.

С учетом симметричности обмоток примем

$$R_A = R_B = R_C = R_s,$$

$$L_A = L_B = L_C = L_s.$$

На пути упрощения математического описания синхронной машины и вообще машин переменного тока, удачным и изящным методом оказался метод пространственного вектора. Суть метода состоит в том, что мгновенные значения симметричных трехфазных переменных состояния (напряжения, токи, потокосцепления) можно математически преобразовать так, чтобы они были представлены одним пространственным вектором. Это математическое преобразование имеет вид (на примере тока статора).

$$\bar{i}_s = \frac{2}{3} (i_A + \bar{a} \cdot i_B + \bar{a}^2 \cdot i_C)$$

где $\bar{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$, $\bar{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ – вектора,

учитывающие пространственное смещение обмоток [5].

Для преобразования уравнений в мгновенных значениях к уравнениям в пространственных векторах умножим первое уравнение на $\frac{2}{3}$, второе – на $\frac{2}{3}\bar{\alpha}$, третье – на $\frac{2}{3}\bar{\alpha}$, и сложим, тогда получим для базиса (ABC)

$$\begin{cases} \bar{U}_s = R_s \cdot \bar{i}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt}, \\ \bar{\Psi}_s = L_s \cdot \bar{i}_s + \Phi_0 \cdot e^{j\omega t} = L_s \cdot \bar{i}_s + \bar{\Phi}_0, \end{cases} \quad (2)$$

где L_s – индуктивность статора,

$\bar{\Psi}_s$ – вектор потокосцепления статора,

$\bar{\Phi}_0$ – вектор магнитного потока от постоянных магнитов ротора.

Электромагнитный момент, развиваемый на валу двигателя:

$$M = \frac{3}{2} z_p \cdot |\bar{\Psi}_s \cdot \bar{i}_s|. \quad (3)$$

Уравнения равновесия моментов на валу двигателя (основное уравнение электромеханики)

$$J \frac{d\omega_M}{dt} = M - M_c \quad (4)$$

где $\omega_M = \frac{\omega_e}{z_p}$ – скорость вращения ротора,

z_p – число пар полюсов.

2.3. Модель синхронной машины в неподвижной системе координат

При составлении модели синхронного двигателя, исходный синхронный двигатель заменяется эквивалентной двухфазной машиной.

Метод пространственного вектора позволяет записать уравнения (2) в базисе ($\alpha\beta$). Уравнения синхронной машины в базисе ($\alpha\beta$)

$$\begin{cases} \bar{U}_s = R_s \cdot \bar{i}_s + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_s}{dt} + j \cdot \omega_M \cdot z_p \cdot \bar{\Psi}_s, \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot |\bar{\Psi}_s \cdot \bar{i}_s|, \\ J \frac{d\omega_M}{dt} = M - M_c. \end{cases} \quad (5)$$

При переходе в двух координатный базис ($\alpha\beta$) в уравнении 1 появилась новое слагаемое. Разложим уравнения по осям неподвижной системы координат α, β .

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = R_s \cdot i_{s\alpha} + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_{s\alpha}}{dt} - \omega_1 \cdot z_p \cdot \Psi_\beta, \\ U_{s\beta} = R_s \cdot i_{s\beta} + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_{s\beta}}{dt} + \omega_1 \cdot z_p \cdot \Psi_\alpha, \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot (\Psi_\alpha \cdot i_{s\beta} - \Psi_\beta \cdot i_{s\alpha}), \\ J \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_c. \end{cases} \quad (6)$$

Проекции пространственного вектора потокоцепления $\bar{\Psi}_s$ на оси α, β , с учетом $\bar{\Psi}_s = L_s \bar{i}_s + \Phi_0 e^{j\omega t} = L_s \bar{i}_s + \bar{\Phi}_0$ (второе уравнение системы (2)), запишем в виде

$$\begin{cases} \Psi_\alpha = \Psi_s \cdot \cos \omega \cdot t = L_\alpha \cdot i_{s\alpha} + \Phi_0 \cdot \cos \omega \cdot t, \\ \Psi_\beta = \Psi_s \cdot \sin \omega \cdot t = L_\beta \cdot i_{s\beta} + \Phi_0 \cdot \sin \omega \cdot t, \end{cases} \quad (7)$$

где L_α, L_β – индуктивности обмоток статора по продольной и поперечной осям ротора, соответственно.

Для машины с постоянными магнитами $\frac{d\Phi_0}{dt} = 0; \Phi_0 = \text{const.}$

С учетом условия (7) перепишем систему (6) в виде

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = R_s \cdot i_{s\alpha} + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_{s\alpha}}{dt} - \omega_1 \cdot z_p \cdot L_s \cdot i_{s\beta} - \omega_1 \cdot z_p \cdot \Phi_0 \cdot \sin \Theta, \\ U_{s\beta} = R_s \cdot i_{s\beta} + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_{s\beta}}{dt} + \omega_1 \cdot z_p \cdot L_s \cdot i_{s\alpha} + \omega_1 \cdot z_p \cdot \Phi_0 \cdot \cos \Theta, \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot (i_{s\beta} (L_s \cdot i_{s\alpha} + \Phi_0 \cdot \cos \Theta) - i_{s\alpha} (L_s \cdot i_{s\beta} + \Phi_0 \cdot \sin \Theta)), \\ J \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_c. \end{cases} \quad (8)$$

Структурная схема, соответствующая системе уравнений (8) приведена на рисунке 17. На структурной схеме $T_\sigma = \frac{L_s}{R_s} \text{ с.}$ – электромагнитная постоянная времени.

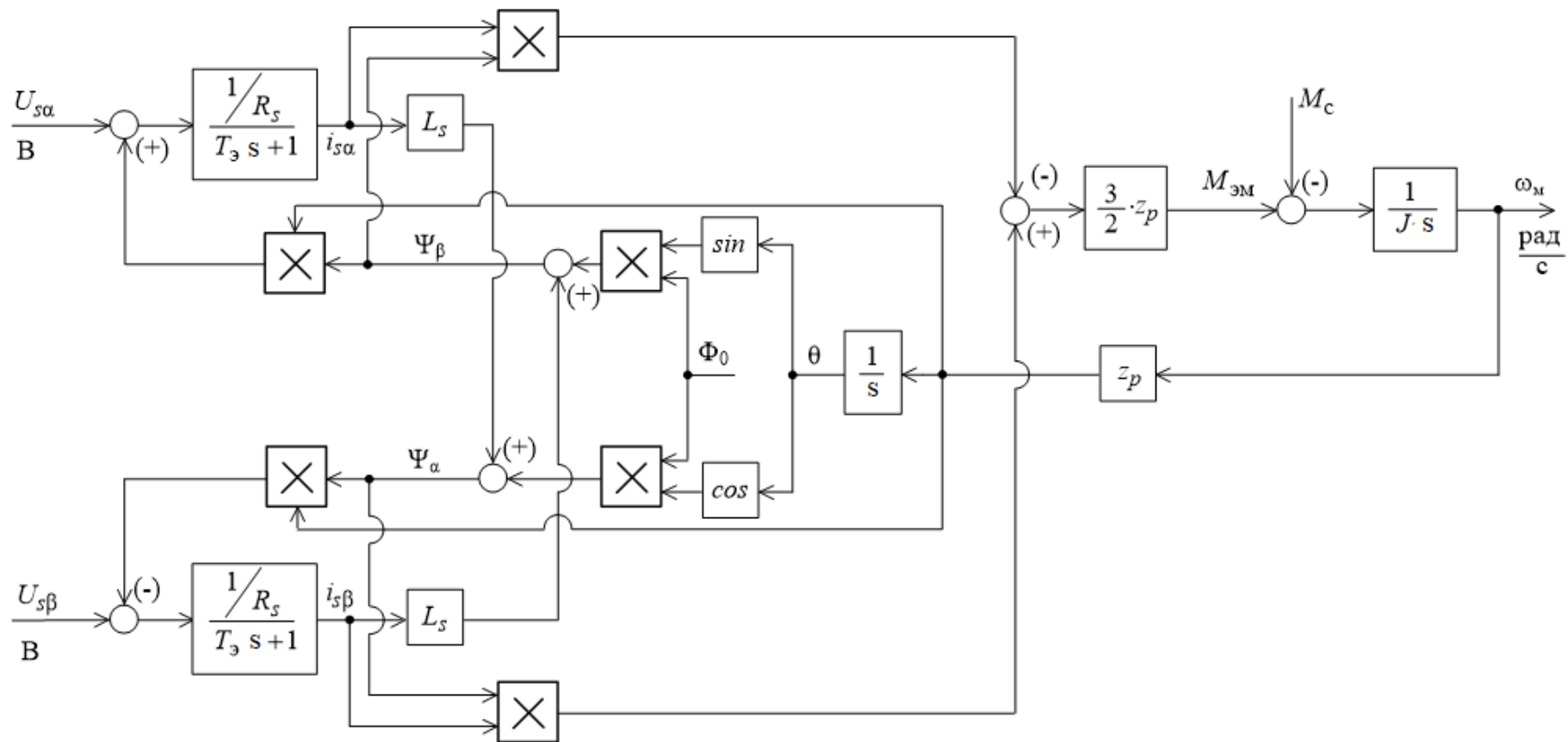


Рисунок 17 – Структурная схема синхронного двигателя с постоянными магнитами в неподвижной системе координат

2.4. Модель синхронной машины во вращающейся системе координат

Для упрощения расчетов динамических процессов в двигателе вводится вращающаяся система координат с ориентацией по положению ротора синхронной машины.

Введем в рассмотрение систему координат d, q связанную с ротором и вращающуюся вместе с ним. Ее скорость вращения всегда равна синхронной скорости. Вектор потока создаваемого постоянными магнитами ротора синхронной машины может быть представлен пространственным вектором, неподвижным относительно ротора и вращающегося вместе с ним, а следовательно вместе с системой координат d, q . Поэтому направив ось d по вектору потока ротора, можно избавиться от проекции вектора на ось q . Таким образом имеем

$$\begin{cases} \bar{\Phi}_0 = \bar{\Phi}_d, \\ 0 = \bar{\Phi}_q. \end{cases}$$

Разложим систему (2) в осях вращающейся системе координат d, q на проекции

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_{sd}}{dt} - \omega_1 \cdot z_p \cdot \Psi_q, \\ U_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_{sq}}{dt} + \omega_1 \cdot z_p \cdot \Psi_d, \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot (i_{s\beta} \cdot \Psi_q - i_{s\alpha} \cdot \Psi_d), \\ J \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_c. \end{cases} \quad (9)$$

Проекция пространственного вектора потокосцепления $\bar{\Psi}_s$ на оси d, q , с учетом $\bar{\Psi}_s = L_s \cdot \bar{i}_s + \Phi_0 \cdot e^{j\omega t} = L_s \cdot \bar{i}_s + \bar{\Phi}_0$ (второе уравнение системы (2)), запишем в виде

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d \cdot i_{sd} + \Phi_0, \\ \Psi_q = L_q \cdot i_{sq}. \end{cases} \quad (10)$$

С учетом (10) система (9) запишется в виде

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_s \cdot \frac{d\bar{i}_{sd}}{dt} - \omega_1 \cdot z_p \cdot L_s \cdot i_{sq}, \\ U_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_s \frac{d\bar{i}_{sq}}{dt} + \omega_1 \cdot z_p \cdot L_s \cdot i_{sd} + \omega_1 \cdot z_p \cdot \Phi_0, \\ M = \frac{3}{2} z_p \cdot (i_{sd} \cdot (L_s \cdot i_{sq}) - i_{sq} (L_s \cdot i_{sd} + \Phi_0)), \\ J \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_c. \end{cases} \quad (11)$$

Структурная схема двигателя соответствующая системе (11) приведена на рисунке 18. На структурной схеме $T_\gamma = \frac{L_s}{R_s}$ с, – электромагнитная постоянная времени [5].

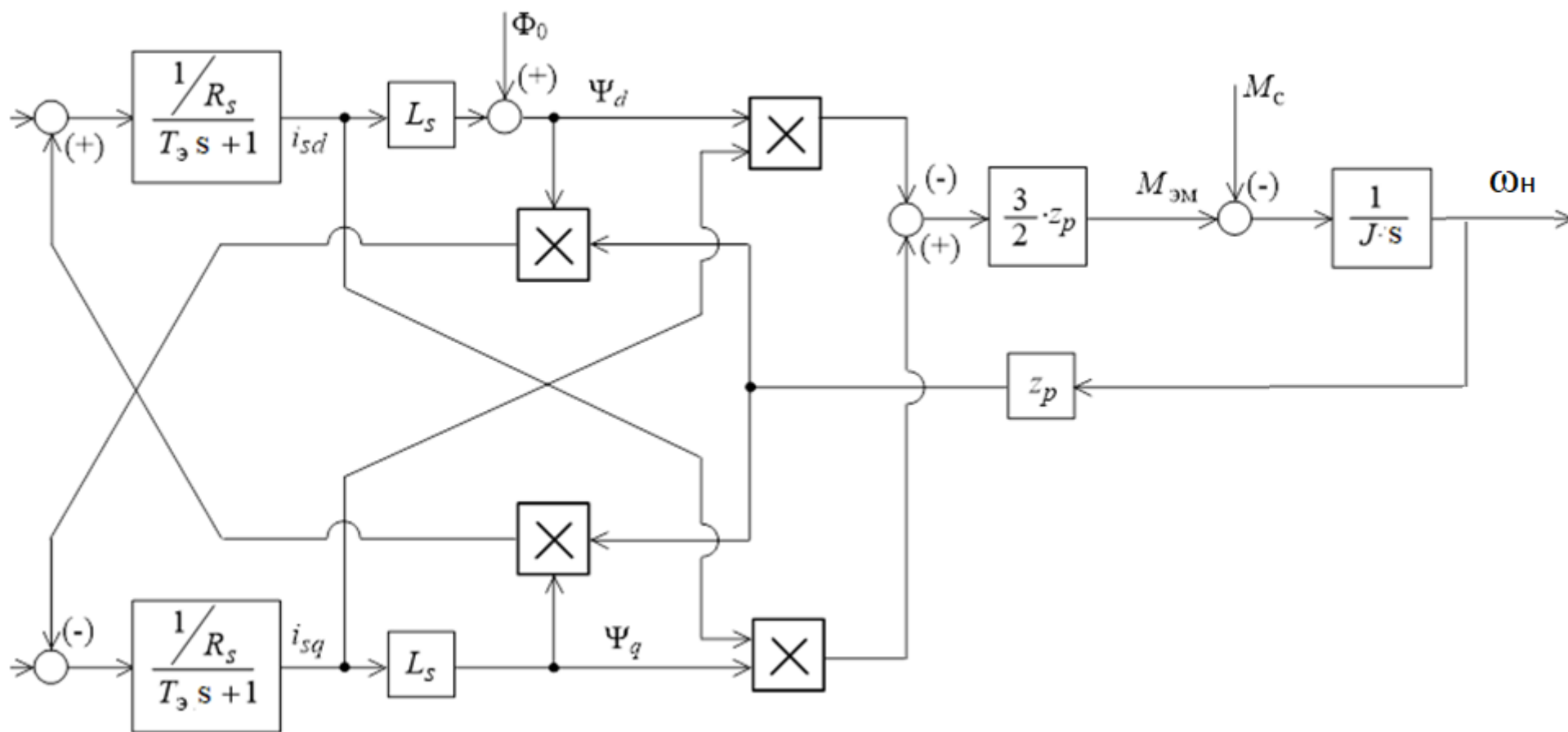


Рисунок 18 – Структурная схема синхронного двигателя с постоянными магнитами во вращающейся системе координат

3. Синтез параметров регулятора электропривода.

В современной инженерной практике широкое распространение получила настройка регулятора по принципу подчиненного регулирования. Этот принцип заключается в разбиение системы на несколько контуров и каждый контур настраивается стандартно.

Настройку начинают с внутреннего контура. Внешний контур по отношению к настраиваемому подчиненному контуру является задающим. Последовательная коррекция такого рода сводится к получению стандартных показателей качества.

Упрощенная структурная схема позиционного следящего электропривода изображена на рисунке 19. Система состоит из трех контуров: контура тока, контура скорости и контура положения. В качестве электромеханического преобразователя силового канала применен выбранный двигатель переменного тока с постоянными магнитами.

Оптимальные показатели качества переходного процесса обеспечиваются с помощью последовательных корректирующих устройств: регулятора тока, регулятора скорости и регулятора положения [6].

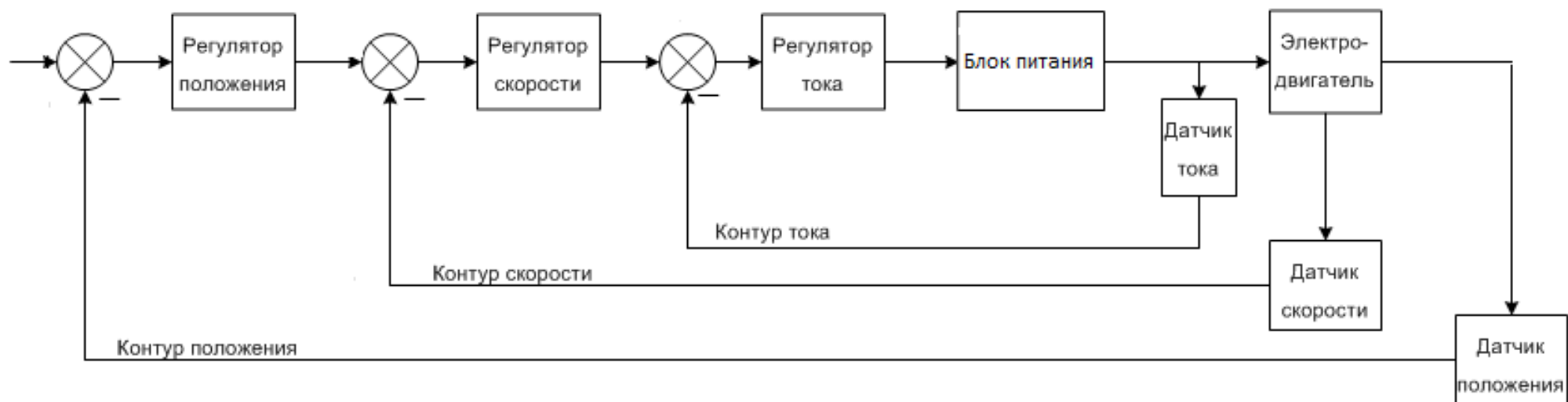


Рисунок 19 - Упрощенная структурная схема позиционного следящего электропривода

3.1. Синтез регулятора тока

Внешний вид структурной схемы контура тока представлен на рисунке 20.

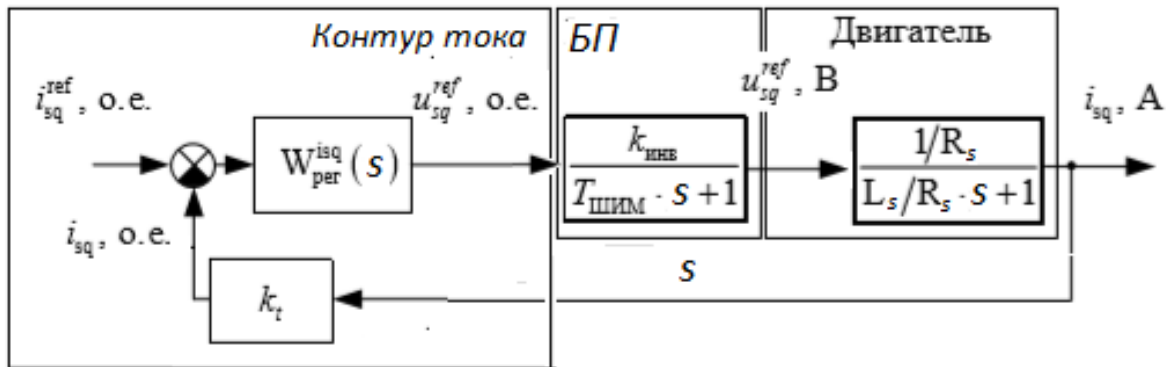


Рисунок 20 - Внешний вид структурной схемы контура тока.

В рассматриваемой структурной схеме (см. рисунок 20) контур тока состоит из регулятора тока, блока питания и датчика тока. Блок питания включает широтно-импульсный преобразователь и является существенно нелинейным звеном, следовательно, с большой степенью точности можно считать, что динамические свойства преобразователя описываются инерционным звеном:

$$W_{\text{бп}}(s) = \frac{K_{\text{инв}}}{T_{\text{ШИМ}}s + 1}$$

$K_{\text{инв}} = 179$ – коэффициент усиления инвертора, при питающем напряжении стороны постоянного тока.

$T_{\text{ШИМ}}$ – постоянная времени, которую можно определить зная частоту ШИМ инвертора $f_{\text{ШИМ}} = 6000$ кГц,

$$T_{\text{ШИМ}} = \frac{1}{f_{\text{ШИМ}}} = \frac{1}{6000} = 0.17 \text{ мс.}$$

Учитывая, что динамические свойства датчика тока определяются пропорциональным звеном, запишем передаточную функцию разомкнутого контура тока:

$$W_{\text{кт}}(s) = W_{\text{пт}}(s) \frac{\frac{K_{\text{инв}} K_{\text{т}}}{R_s}}{(T_{\text{ШИМ}}s + 1)(T_3s + 1)} \quad (12)$$

Коэффициент передачи датчика тока примем $K_{\text{т}} = 1$.

Постоянная времени инвертора ($T_{\text{шим}}$) относится к малой постоянной времени. Электромагнитная постоянная времени ($T_э$) подлежит компенсации. Поэтому для настройки контура тока на модульный оптимум следует выбрать ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{\text{рт}}(s) = \frac{K_{\text{рт}}(T_{\text{рт}}s + 1)}{T_{\text{рт}}s} \quad (13)$$

Где $T_{\text{рт}} = T_э = \frac{L_s}{R_s} = \frac{0.019}{4.7} = 0.004$ с – постоянная времени регулятора тока

Расчетные формулы параметров регулятора тока принимают вид:

$$K_{\text{рт}} = \frac{L_s}{a_{\text{т}} \cdot T_{\text{шим}} \cdot K_{\text{т}} \cdot K_{\text{инв}}} = \frac{0.019}{2 \cdot 0.00017 \cdot 1 \cdot 179} = 0.312 \quad (14)$$

$a_{\text{т}} = 2$ – коэффициент оптимизации контура

После подстановки (13) и (14) в (12), получаем передаточную функцию разомкнутого контура тока, настроенного на модульный оптимум:

$$W_{\text{кт}}(s) = \frac{1}{2T_{\text{шим}}s(T_{\text{шим}}s + 1)} \quad (15)$$

Передаточная функция замкнутого контура тока примет вид:

$$W_{\text{ктзамк}}(s) = \frac{W_{\text{кт}}(s)}{1 + W_{\text{кт}}(s)} = \frac{1}{1 + 2T_{\text{шим}}s(T_{\text{шим}}s + 1)} \quad (16)$$

Для связи с параметрами настройки системы управления электропривода, над параметрами регулятора необходимо выполнить ряд преобразований, связанных с особенностями целочисленной арифметики микропроцессора и масштабированием переменных при программной реализации пропорционально-интегрального регулятора [6].

Для дискретной модели регулятора над интегральной составляющей необходимо выполнить ряд преобразований, учитывающих его дискретный характер

$$K_p = K_{pt} = 0.312$$

$$K_i = \frac{dt}{T_{pt}} = \frac{0.00017}{0.004} = 0.0425$$

где $dt = \frac{1}{6000} = 0.00017$ с – период дискретизации системы управления по времени.

K_p – коэффициент пропорционального усиления,

K_i – коэффициент интегрального усиления.

3.2. Синтез регулятора скорости

Настройку контура скорости произведём на симметричный оптимум.

Структурная схема контура скорости с ПИ-регулятором скорости и замкнутым контуром тока, оптимизированным выше, показана на рисунке 21.

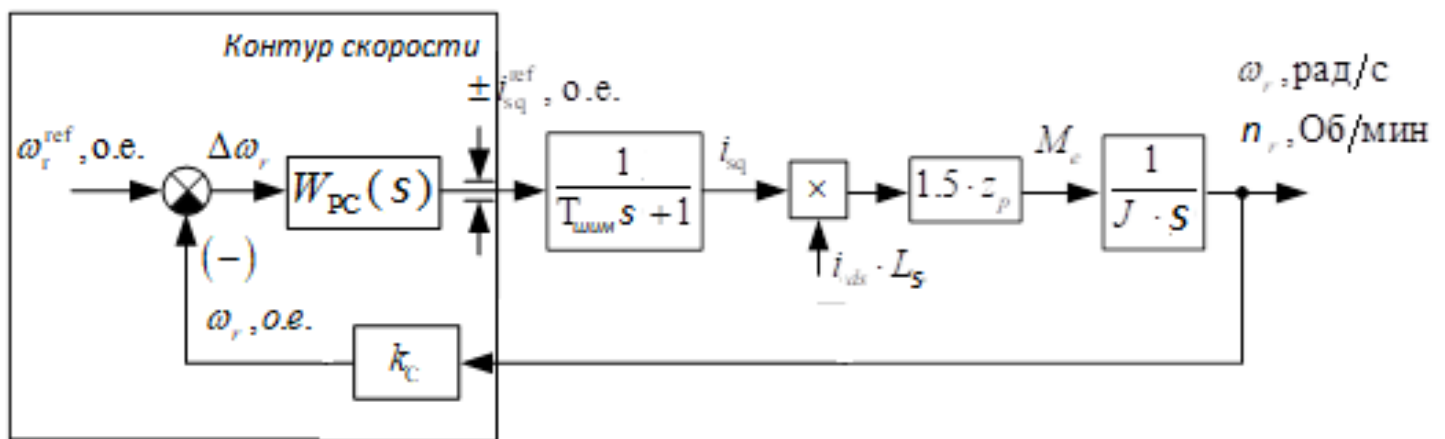


Рисунок 21 - Структурная схема контура скорости.

При настройке контура скорости на симметричный оптимум полагают, что в диапазоне рабочих частот передаточная функция замкнутого контура тока имеет вид:

$$W_{\text{кт замк}}(s) \cong \frac{1}{T_{\text{шм}} s + 1} \quad (17)$$

Коэффициент усиления ПИ-регулятора скорости находим следующим образом:

$$K_{PC} = \frac{J}{2 \cdot T_{kc} \cdot 1.5 \cdot z_p \cdot K_C \cdot \Psi_R \cdot L_S} \quad (18)$$

Постоянную времени регулятора находим по выражению:

$$T_{PC} = \frac{2 \cdot J}{K_{PC} \cdot K_C \cdot 1.5 \cdot z_p \cdot \Psi_R \cdot L_S} \quad (19)$$

где $\Psi_R = 0.21$ Вб – потокосцепление ротора;

$T_{kc} = 2 \cdot T_{uim} = 2 \cdot 0.00017 = 0.34$ мс – малая некомпенсируемая постоянная времени контура скорости.

Коэффициент обратной связи по скорости примем равным единице:

$$K_C = 1 \quad (20)$$

Подставляем выражение (20) в выражения (18) и (19) получаем:

$$K_{PC} = \frac{J}{2 \cdot T_{kc} \cdot 1.5 \cdot z_p \cdot K_C \cdot \Psi_R \cdot L_S} = \frac{0.0056}{2 \cdot 0.00034 \cdot 1.5 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 0.21 \cdot 0.019} = 172$$

$$T_{PC} = \frac{2 \cdot J}{K_{PC} \cdot K_C \cdot 1.5 \cdot z_p \cdot \Psi_R \cdot L_S} = \frac{2 \cdot 0.0056}{172 \cdot 1 \cdot 1.5 \cdot 8 \cdot 0.21 \cdot 0.019} \approx 0.00136 \text{ с}$$

Для дискретной модели регулятора необходимо дополнительно выполнить расчет коэффициента интегральной составляющей:

$$K_i = \frac{dt}{T_{pc}} = \frac{0.0005}{0.00136} = 0.368$$

где $dt = \frac{1}{2000} = 0.0005$ с – шаг расчёта контура управления скоростью по времени.

3.3. Синтез регулятора положения.

При синтезе регулятора положения для контура положения необходимо исходить из требований по точности, сформулированных в техническом задании на проектирование.

Контур положения настроим на модульный оптимум. Структурная схема контура представлена на рисунке 22.

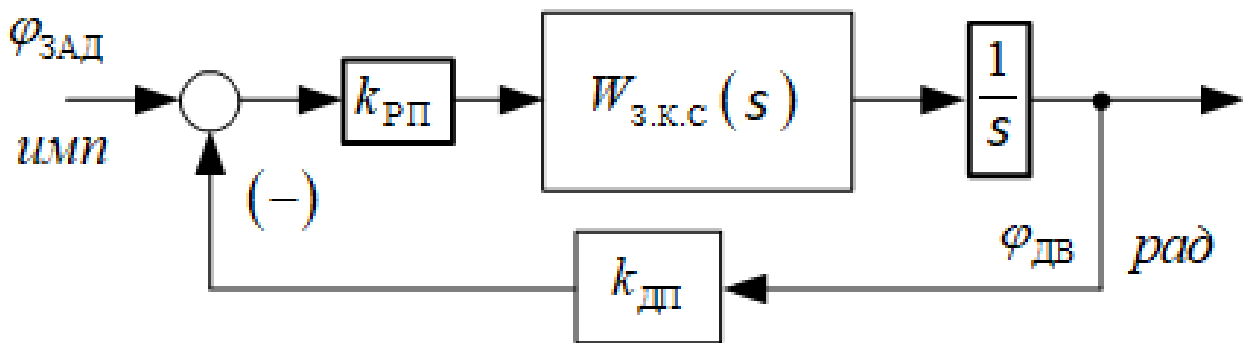


Рисунок 22 - Структурная схема контура скорости.

Сигнал положения в модели измеряется в радианах, а в лабораторной установке – в метках резольвера [7].

Для математической модели коэффициент обратной связи датчика положения рассчитывается следующим образом:

$$K_{\text{дп}} = \frac{N}{2 \cdot \pi} = \frac{4096}{2 \cdot \pi} = 652,23 \frac{\text{имп}}{\text{рад}} \quad (21)$$

где N – число меток на оборот резольвера.

Малая постоянная времени контура положения:

$$T_{\text{кп}} = 2T_{\text{кс}} = 2 \cdot 0.00034 = 0.00068 \text{ с} \quad (22)$$

Контур положения оптимизируем по МО. Принимаем П-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{\text{рп}}(s) = K_{\text{РП}} = \frac{K_{\text{С}}}{K_{\text{дп}} \cdot a_n \cdot T_{\text{кп}}} = \frac{1}{652 \cdot 2 \cdot 0.00068} = 1.13 \quad (23)$$

4. Моделирование переходных процессов

4.1. Имитационное и экспериментальное моделирование

Для проверки правильности проведённого синтеза параметров позиционного регулятора воспользуемся методом имитационного моделирования. Программный пакет MexBIOS Development Studio даёт возможность для детальной имитации системы на уровне структурной схемы. Смоделируем переходные процессы с расчетными параметрами в каждом контуре по отдельности и сравним их с переходными процессами снятыми с реального объекта.

На рисунках (21) и (22) представлены графики переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре тока при расчетных параметрах $K_p = 0.312, K_i = 0.0425$.

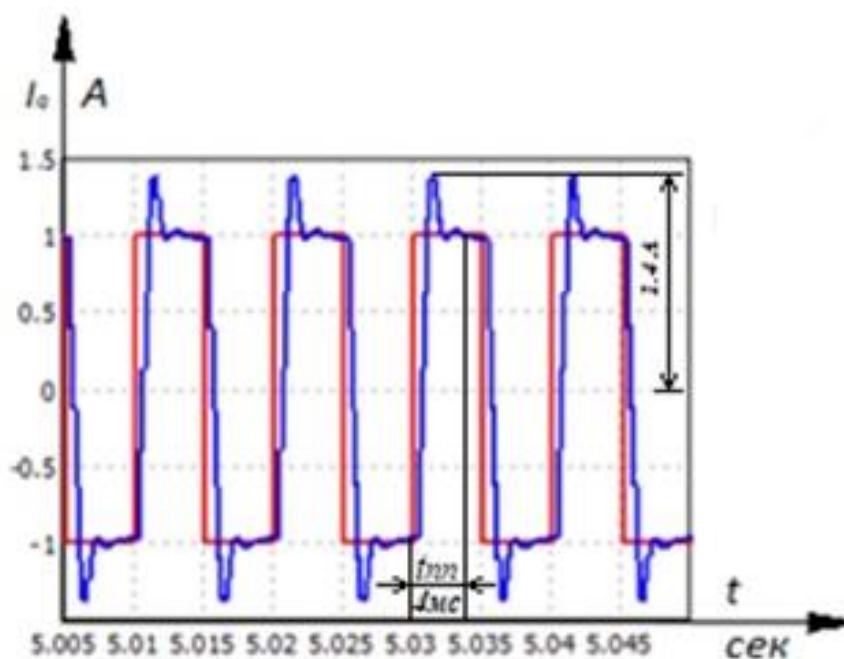


Рисунок 21 - Смоделированный график переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре тока.

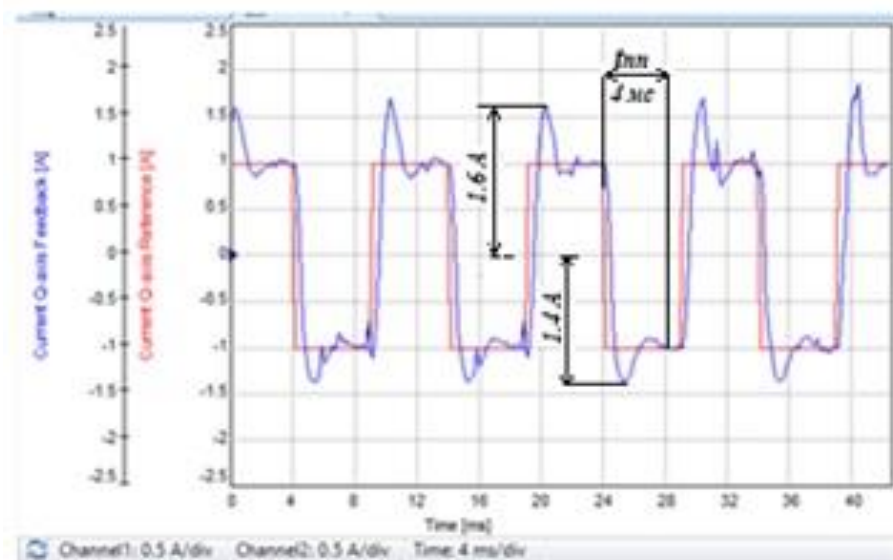


Рисунок 22 - График переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре тока на реальном объекте.

При расчетных параметрах регулятора тока перерегулирование составило $\sigma = 40\%$, а время переходного процесса $t_{\text{пп}} = 4$ мс.

Оценим влияние коэффициентов регулятора на переходные процессы в контуре тока. На рисунках 23 и 24 представлены графики переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре тока с повышенным коэффициентом пропорциональности регулятора тока при $K_p = 0.5$, $K_i = 0.0425$.

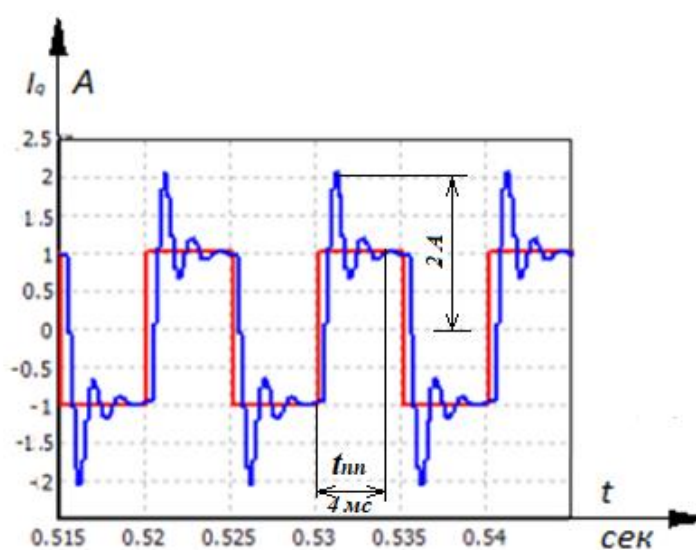


Рисунок 23 - Смоделированный график переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре тока с повышенным K_p .

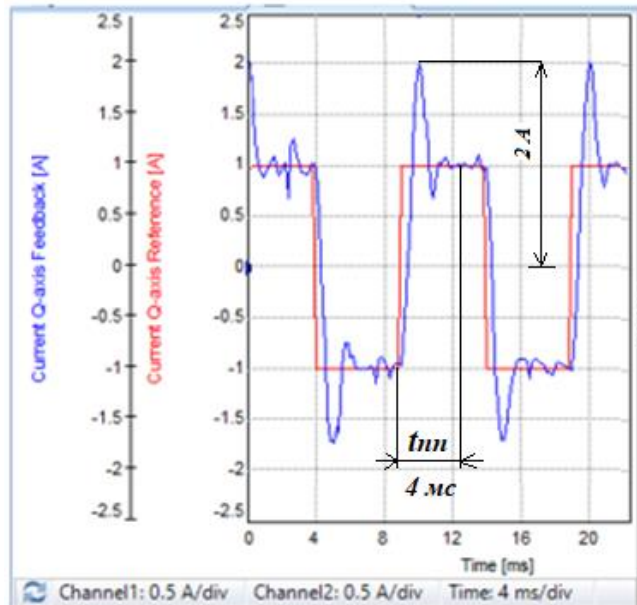


Рисунок 24 - График переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре тока на реальном объекте с повышенным K_p .

По рисункам 23 и 24 можно сделать вывод, что с повышенным K_p в системе увеличились перерегулирование $\sigma = 40\%$, увеличились колебательные процессы, а время переходного $t_{пп} = 4$ мс процесса осталось тем же.

На рисунках 25 и 26 представлены графики переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре тока с повышенным коэффициентом интегрирования регулятора тока при $K_p = 0.312, K_i = 4.25$.

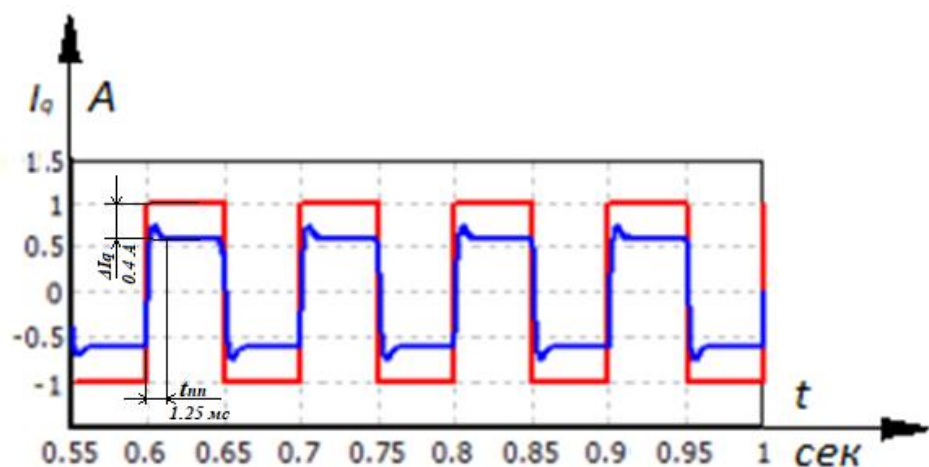


Рисунок 25 - Смоделированный график переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре тока с повышенным K_i .

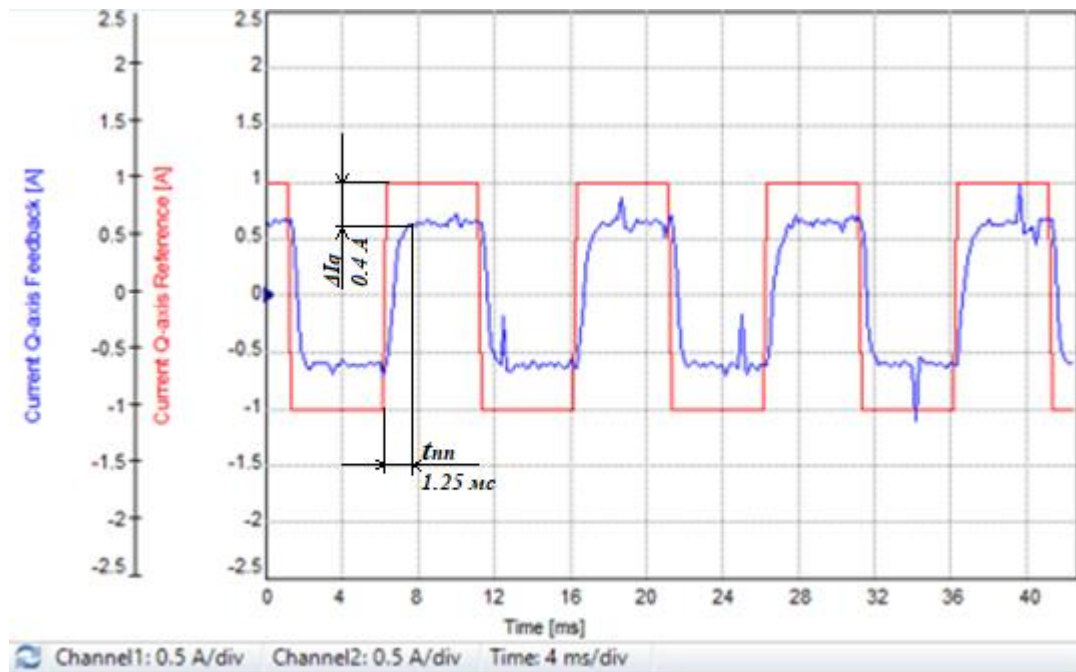


Рисунок 26 - График переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре тока на реальном объекте с повышенным K_i .

По рисункам 25 и 26 можно сделать вывод, что с повышенным K_i в системе появилась статическая ошибка $\Delta I_q = 0.4$ А.

На рисунках 27 и 28 представлены графики переходных процессов при изменении задающего воздействия в контуре скорости при расчетных параметрах $K_p = 172$, $K_i = 0.368$.

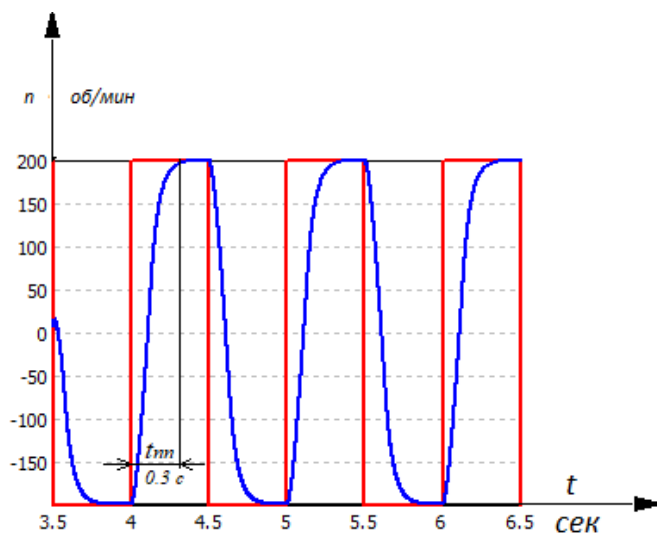


Рисунок 27 - Смоделированный график переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре скорости.

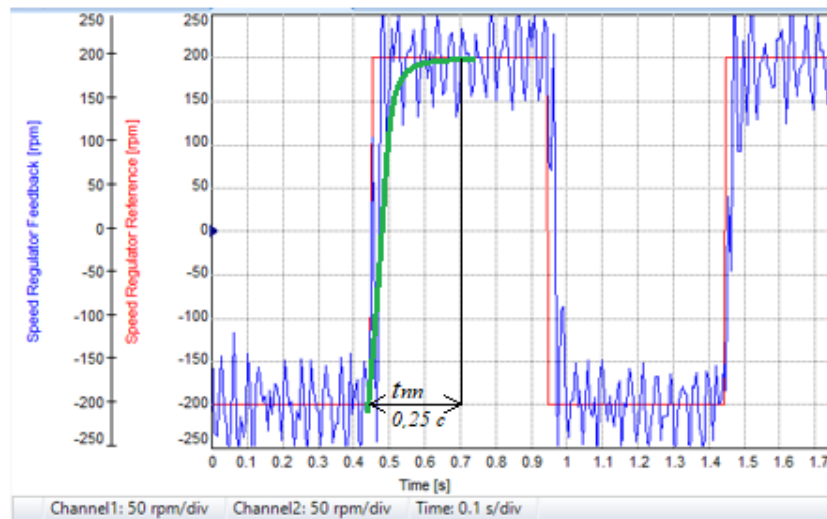


Рисунок 28 - График переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре скорости на реальном объекте.

Время переходного процесса с расчетными параметрами регулятора скорости составило $t_{\text{пп}} = 0,3$ с при моделировании и $t_{\text{пп}} = 0,25$ с на реальном объекте.

Колебательность переходного процесса снятого с реального объекта объясняется тем, что синус и косинус резольвера сдвинуты относительно друг друга (рисунок 29). Если усреднить график переходного процесса реального объекта то, он будет примерно походить на график смоделированного переходного процесса. Это допущение относится ко всем графикам переходного процесса реального объекта в контуре скорости.

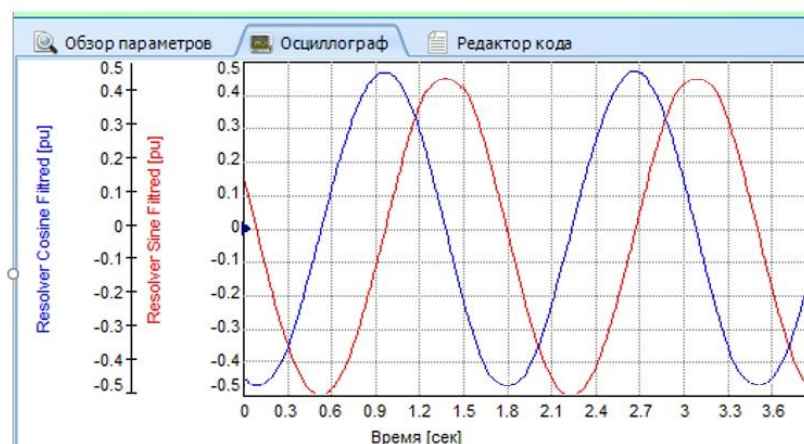


Рисунок 29 - Синус и косинус резольвера.

На рисунках 30 и 31 представлены графики переходных процессов при изменении задающего воздействия в контуре скорости при расчетных параметрах контура тока, и при заниженном коэффициенте пропорциональности контура скорости $K_p = 60, K_i = 0.368$.

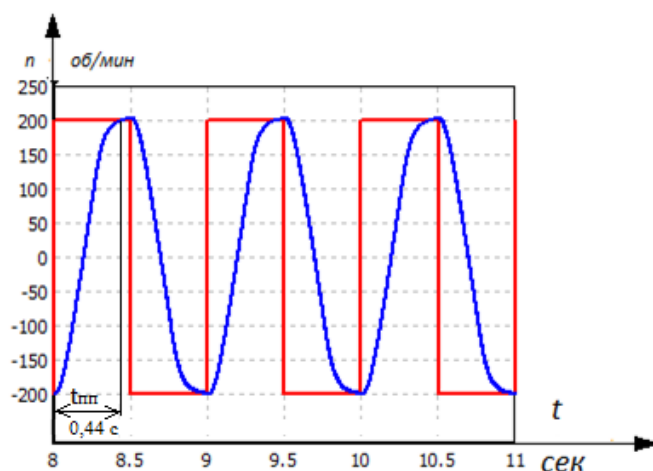


Рисунок 30 - Смоделированный график переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре скорости с заниженным K_p .

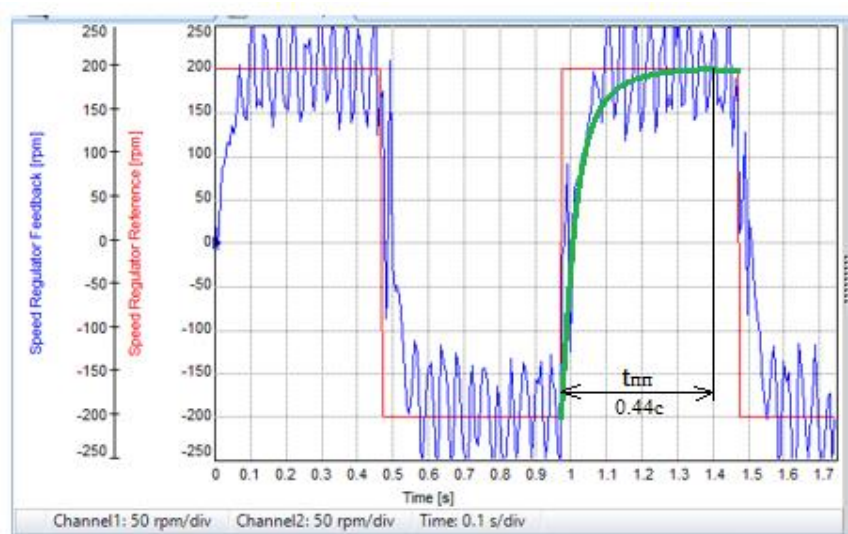


Рисунок 31 - График переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре скорости на реальном объекте с заниженным K_p .

Из рисунков 30 и 31 следует то, что при заниженном коэффициенте пропорциональности в контуре скорости увеличивается время переходного процесса $t_{пп} = 0,44$ с по сравнению с временем переходного процесса с расчетными параметрами.

На рисунках 32 и 33 представлены графики переходных процессов при изменении задающего воздействия в контуре скорости при расчетных параметрах контура тока, и при завышенном коэффициенте интегрирования контура скорости $K_p = 172, K_i = 18$.

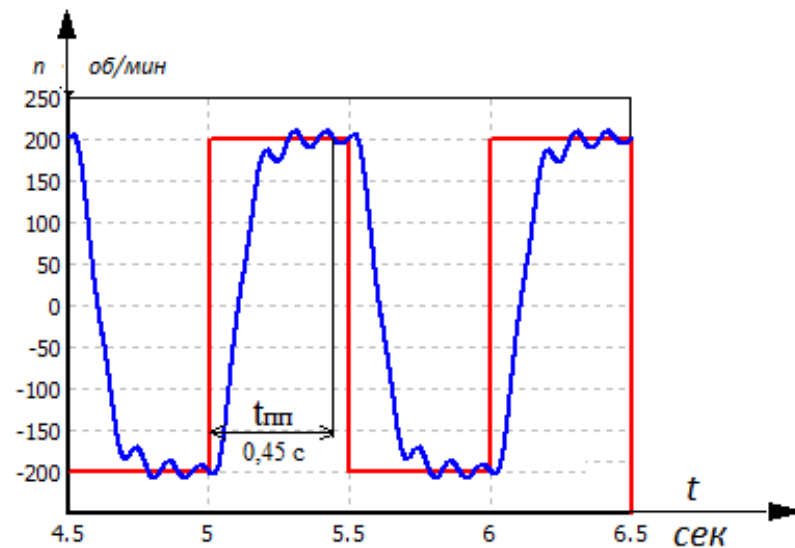


Рисунок 32 - Смоделированный график переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре скорости с завышенным K_i .

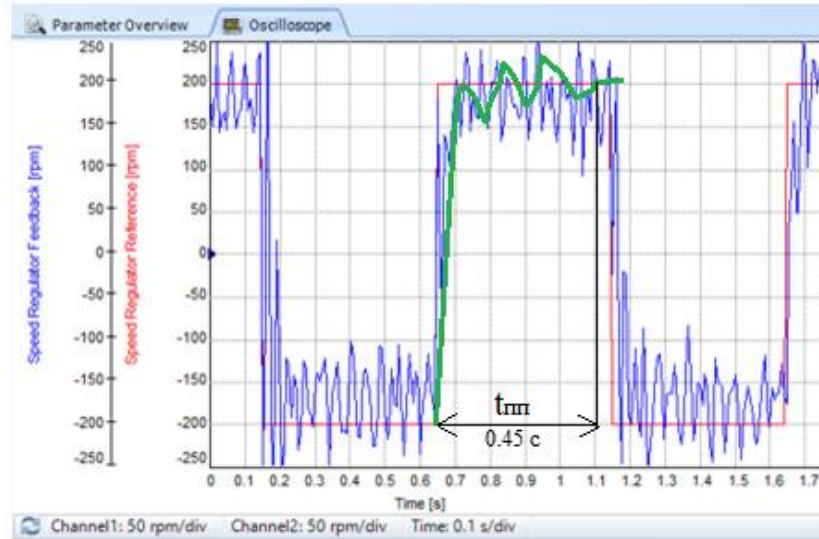


Рисунок 33 - График переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре скорости на реальном объекте с завышенным K_i

При сравнении графиков переходных процессов в контуре скорости с завышенным коэффициентом интегрирования (рисунки 32 и 33) и графиков с расчетными коэффициентами (рисунки 27 и 28), можно заметить, что в

переходном процессе с завышенным коэффициентом интегрирования наблюдается появление колебательности и увеличение время переходного процесса $t_{\text{пп}} = 0,45$ с.

Переходные процессы позиционного контура смоделируем с помощью программного пакета Matlab-Simulink. На рисунках 34 и 35 приведены графики переходных процессов в позиционном контуре при расчетных параметрах смоделированный в программной среде Matlab-Simulink и снятый с реального объекта.

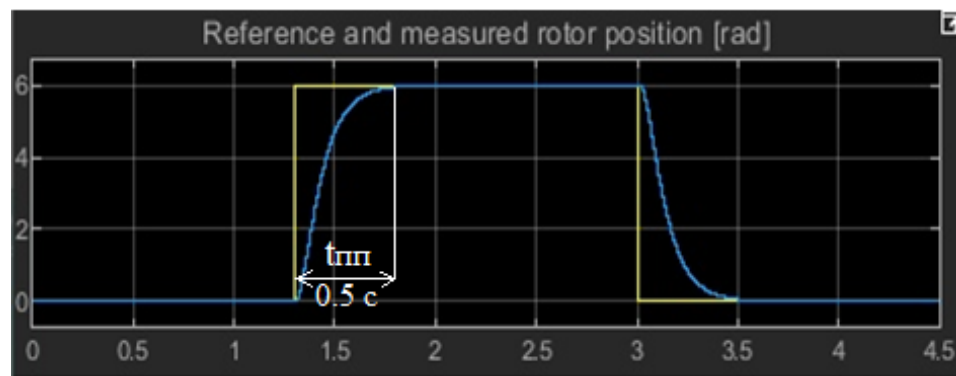


Рисунок 34 - Смоделированный график переходного процесса при изменении позиционного задающего воздействия.

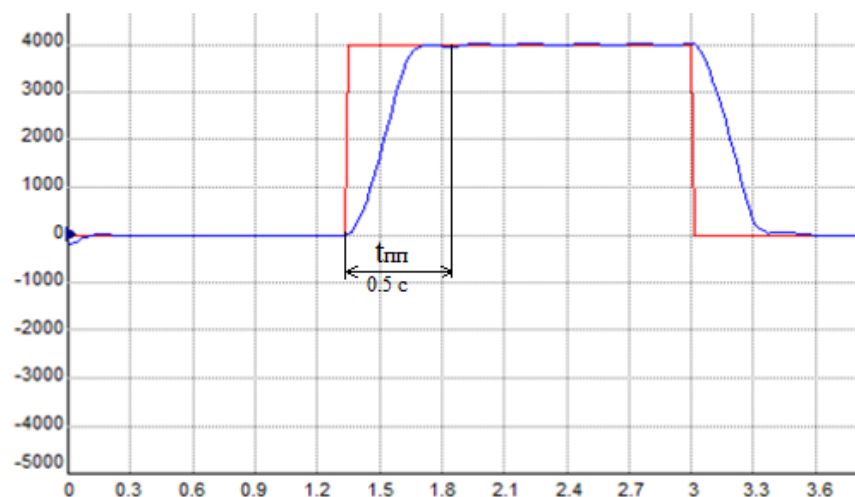


Рисунок 35 - График переходного процесса при изменении позиционного задающего воздействия на реальном объекте.

По рисунку 34 и 35 видно, что статическая ошибка регулирования равна нулю, перерегулирование отсутствует, время переходного процесса $t_{\text{пп}} = 0,5$ с находится в допустимых пределах, и объясняется тем, что ротор

двигателя имеет свою инертность и не может мгновенно перемещаться в пространстве.

Для сравнения приведем графики переходных процессов при расчетных параметрах регуляторов тока и скорости, но заниженным коэффициенте пропорциональности регулятора контура положения $K_{рП} = 0.25$.

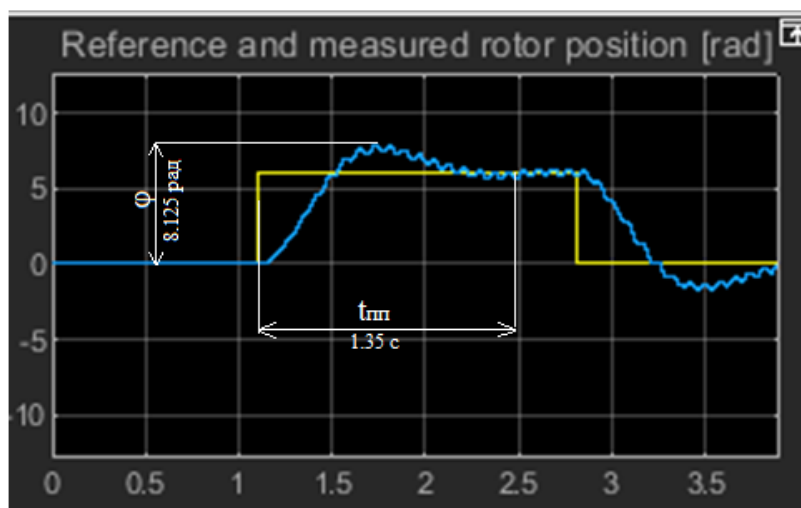


Рисунок 36 - Смоделированный график переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре положения с заниженным K_p .

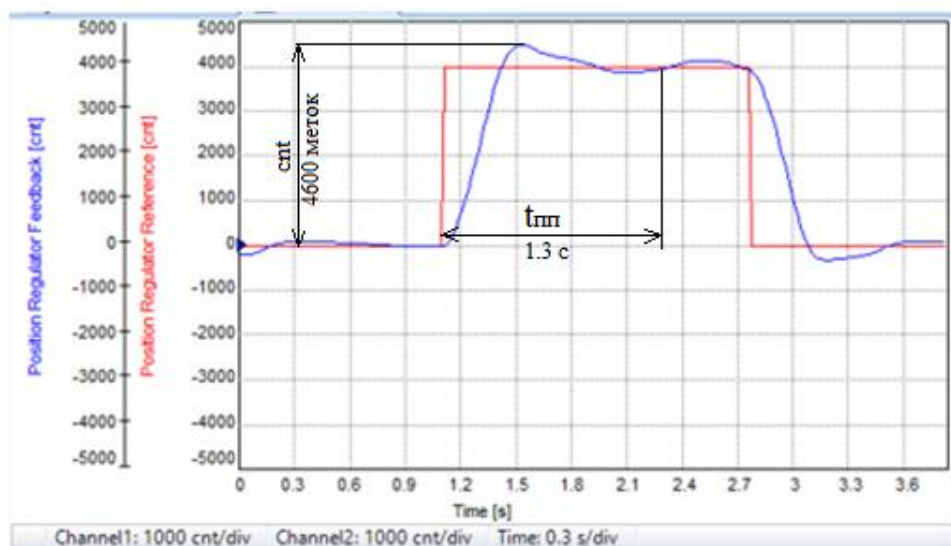


Рисунок 37 - График переходного процесса при изменении задающего воздействия в контуре положения на реальном объекте с заниженным K_p .

При пониженном коэффициенте пропорциональности в переходных характеристиках позиционного контура появилось перерегулирование $\sigma = 12.5 \%$,

увеличилось время переходного процесса $t_{\text{пп}} = 1.3 \text{ с}$, вследствие того, что появилась колебательность системы.

5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данного раздела является обоснование целесообразного использования технических решений, рассмотренных в рамках выпускной квалификационной работы, при этом детально рассматриваются планово-временные и материальные показатели процесса обеспечения наиболее стабильной и производительной работы электропривода.

Достижение цели обеспечивается решением следующих задач:

- Планирование технико-конструкторских работ.
- Формирование сметы затрат на разработку технического проекта.
- Определение ресурсосберегающей эффективности работы.

5.1. Организация работ технического проекта

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках выполнения технического проектирования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика процесса выполнения ВКР.

5.1.1. Структура работ в рамках технического проектирования

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и дипломник. Составлен перечень этапов и работ в рамках проведения проектирования и произведено распределение полномочий по видам работ внутри рабочей группы.

Номерам этапов соответствуют следующие виды выполняемых работ, представленные в таблице 4:

№1 - составление и утверждение технического задания – включает в себя изучение первичной информации об объекте исследования, формулировку требований к техническому проекту, составление задания и плана на работу;

№2 - Подбор и изучение материалов по теме - ознакомление с предметом работы, изучение различных источников, касающихся различных сторон технического проекта;

№3 - Расчет параметров синхронного двигателя - проведение расчета параметров и построение статических характеристик выбранного электродвигателя: ДСМ71;

№4 - Моделирование системы электропривода - создание и наладка модели автоматизированного электропривода спортивного тренажера на базе мультистанции Hastings HastPower Pro, нагрузочным двигателем является - ДСМ71.

№5 – Моделирование процессов работы электропривода – получение экспериментальных данных работы и поведения электропривода при номинальных параметрах и критических режимах работы;

№6 – Анализ полученных данных – анализ полученных результатов при помощи моделирования режимов работы электропривода.

№7 – Оценка эффективности полученных результатов – обоснования целесообразного использования технических решений, рассмотренных в рамках технического проекта с учетом ресурсов и энергоэффективности;

№ 8 – Составление пояснительной записки – оформление результатов проектной деятельности;

№ 9 - Проверка выпускной квалификационной работы руководителем - в рамках учебно-практической работы, включает в себя окончательную проверку ВКР руководителем и устранение недочетов дипломником.

№10 – Исправление замечаний к ВКР – исправление всех замечаний и устранение недоработок.

№11 – Подготовка к защите ВКР – подготовка презентации и доклада, согласование с преподавателем стратегии защиты перед аттестационной государственной комиссией.

Таблица 4 – Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работ	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Подбор и изучение материалов по теме	2	Ознакомление с предметом работы	Дипломник
Расчеты и моделирование системы электропривода спортивного тренажера при различных режимах работы	3	Проведение расчета параметров синхронного двигателя ДСМ71	Дипломник
	4	Моделирование системы электропривода	Дипломник, Руководитель
	5	Моделирование процессов работы электропривода спортивного тренажера	Дипломник, Руководитель
	6	Анализ полученных данных	
Обобщение и оценка результатов	7	Оценка эффективности полученных результатов	Дипломник, Руководитель
Оформление отчета по техническому проектированию	8	Составление пояснительной записки	Дипломник
	9	Проверка выпускной квалификационной работы руководителем	Руководитель
	10	Исправление замечаний к ВКР	Дипломник
Сдача ВКР	11	Подготовка к защите ВКР	Дипломник, Руководитель

5.1.2. Определение трудоемкости выполнения технического проекта

Трудоемкость выполнения технического проекта оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ож}$ используется следующая формула [8]:

$$t_{ож} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (24)$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

В таблице 5 приведены ожидаемая трудоемкость и время выполнения работ.

Таблица 5 – Продолжительность работ, раб. дн.

№	Название работы	Научный руководитель			Дипломник		
		Мин. трудоемкость	Макс. трудоемкость	Ожидаемая трудоемкость	Мин. трудоемкость	Макс. трудоемкость	Ожидаемая трудоемкость
1	Составление и утверждение технического задания	1	1	1	-	-	-
2	Подбор и изучение материалов по теме	1	4	3	25	30	28
3	Проведение расчета параметров СД ДСМ71	-	-	-	4	9	7
4	Моделирование системы электропривода	2	3	3	7	14	11
5	Моделирование процессов работы электропривода спортивного тренажера.	2	5	4	8	15	12

Продолжение таблицы 5.

6	Анализ полученных данных	-	-	-	3	5	4
7	Оценка эффективности полученных результатов	1	1	1	2	5	4
8	Составление пояснительной записки	-	-	-	6	11	9
9	Проверка выпускной квалификационной работы руководителем	1	1	1	-	-	-
10	Исправление замечаний в выпускной квалификационной работе	-	-	-	2	7	5
11	Подготовка к защите выпускной квалификационной работы	1	2	2	2	7	5

5.1.3. Разработка графика проведения технического проекта

Наиболее удобным и наглядным в данном случае является построение ленточного графика проведения работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ [8].

График строится для ожидаемого по длительности исполнения работ в рамках технического проекта, с разбивкой по месяцам и декадам за период времени подготовки ВКР. На основе данных таблицы 5 строим план-график проведения работ (таблица 6)

Исходя из составленной диаграммы, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает 12 декад, начиная со второй декады

февраля, заканчивая первой декадой июня. Продолжительность выполнения технического проекта составит 100 дней. Из них:

85 дней – продолжительность выполнения работ дипломника;

15 дней – продолжительность выполнения работ руководителя;

Таблица 6– Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исполнители	T _{pi} , раб. дн.	Продолжительность выполнения работ												
				Февр.		Март			Апрель			Май			Июнь	
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1	-												
2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель	3	-												
		Дипломник	28	-	-	-	-									
3	Проведение расчета параметров СД ДСМ71	Дипломник	7				-	-								
4	Моделирование системы электропривода	Руководитель	3					-								
		Дипломник	11					-	-							
5	Моделирование процессов работы электропривода спортивного тренажера.	Руководитель	4						-	-						
		Дипломник	12						-	-	-					
6	Анализ полученных данных	Дипломник	4								-	-				
7	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	1									-				
		Дипломник	4									-	-			
8	Составление пояснительной записки	Дипломник	9									-	-	-		
9	Проверка выпускной квалификационной работы руководителем	Руководитель	1											-		
10	Исправление замечаний в выпускной квалификационной работе	Дипломник	5											-	-	
11	Подготовка к защите выпускной квалификационной работы	Руководитель	2												-	
		Дипломник	5												-	-

5.2. Составление сметы затрат на разработку ТП

Смета затрат включает в себя следующие статьи [9]:

- материальные затраты;
- полная заработная плата исполнителей технического проекта;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

5.2.1. Расчет материальных затрат

В материальные затраты включаются затраты на информационные носители (флеш-карты), канцелярские принадлежности (бумага, ручки, карандаши, линейки).

Изучив ассортимент интернет магазина канцелярских товаров ТД „Канцелярский мир”, было принято решение выделить на расходы, связанные с материальными затратами, сумму в размере 1000 (одной тысячи) рублей.

5.2.2. Расчет полной заработной платы исполнителей темы

Полная заработная плата включает основную и дополнительную заработную плату и определяется как [9]:

$$З_{полн} = З_{осн} + З_{доп},$$

где $З_{осн}$ — основная заработная плата;

$З_{доп}$ — дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($З_{осн}$) исполнителя рассчитывается исходя из трудоемкости работ и квалифицированных исполнителей по следующей формуле [9]:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p,$$

где $З_{осн}$ — основная заработная плата одного работника;

$З_{дн}$ — среднедневная заработная плата работника, руб.

T_p — продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.;

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле [9]:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{ок}} + З_{\text{р.к.}}}{F_{\text{д}}},$$

где $З_{\text{ок}}$ – оклад, руб.;

$З_{\text{р.к.}}$ – районная доплата (составляет 30% от оклада), руб.;

$F_{\text{д}}$ – количество рабочих дней в месяце (26 при 6-дневной рабочей неделе),
раб. дн.

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 7.

Таблица 7 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	Районная доплата, руб	Месячная заработная плата,руб.	Среднедневная заработная плата, руб.	Кол-во рабочих дней.	Основная заработная плата, руб.
Руководитель	33664	10099,2	43763,2	1683,2	15	25248
Дипломник	11700	3510	15210	585	85	49725
Итого						74973

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15) [8].

Расчёт полной заработной платы приведён в таблице 8.

Таблица 8 – Расчет полной заработной платы

Исполнители	Коэффициент дополнительной заработной платы.	Основная заработная плата, тыс.руб.	Дополнительная заработная плата, тыс.руб.	Полная заработная плата, тыс.руб.
Руководитель	0,15	25,2	3,8	29,0
Дипломник	0.12	49,7	6,0	55,7
Итого		74,9	9,8	84,7

5.2.3. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}),$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2019 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2%.

Отчисления во внебюджетные фонды составят:

$$З_{внеб} = 0,302 \cdot 84,7 = 25,6 \text{ тыс. руб.}$$

5.2.4. Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

$$З_{накл} = \frac{(З_{мат.} + З_{полн.} + З_{внеб.})}{1 - k_{нр.}} k_{нр.},$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величина коэффициента накладных расходов принимается в размере 16% ($k_{нр}=0,16$).

5.3. Формирование сметы затрат технического проекта

Рассчитанная величина затрат технического проекта является основой для формирования бюджета затрат работы, который, при заключении договора с

заказчиком, защищает организацию подрядчика в качестве нижнего предела затрат на разработку технической продукции [9].

Определение сметы затрат на технический проект приведено в таблице 9.

Таблица 9 – Смета затрат технического проекта

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Структура затрат, %
1. Материальные затраты ТП	1,0	0,8
2. Затраты по полной заработной плате исполнителей темы	84,7	63,9
3. Отчисления во внебюджетные фонды	25,6	19,3
4. Накладные расходы	21,2	16,0
5. Итого	132,5	100,0

В ходе выполнения данного параграфа была рассчитана продолжительность выполнения технического проекта, которая составляет 87 рабочих дней. Составлен график выполнения работ. Смета затрат на разработку технического проекта составляет 132,5 тыс. руб., из которых более половины (63,9%) составляют затраты на оплату труда. Все результаты работы оказались ожидаемы и могут быть реализованы.

5.4. Определение ресурсоэффективности работы

Определение ресурсоэффективности работы можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности по формуле [8]:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (25)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

b_i – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

Оценку характеристик работы проведем на основе критериев, соответствующих общим требованиям, предъявляемых к системам электропривода спортивного тренажера:

1. Точность: обеспечение электроприводом нужной точности управления движением исполнительного органа механизма.
2. Быстродействие: способность системы достаточно быстро реагировать на различные воздействия.
3. Надежность: способность системы выполнять заданные функции в течение определённого промежутка времени, сохраняя эксплуатационные характеристики.
4. Безопасность: обеспечение безопасности работ персонала, необходимого для осуществления эксплуатации электропривода;
5. Энергоэффективность: обеспечение наиболее малого удельного расхода эл.энергии для осуществления заданного технологического процесса.
6. Ресурсоемкость: обеспечение наиболее экономически выгодной конструкции и технологии производства, выраженное в энергоемкости и материалоемкости производимого электропривода.

Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики приведены в таблице 10.

Таблица 10 - Сравнительная оценка характеристик работы

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки
1. Точность	0,10	4
2. Быстродействие	0,10	4
3. Надежность	0,25	5
4. Безопасность	0,20	5
5. Энергоэффективность	0,25	4
6. Ресурсоемкость	0,10	4
Итого:	1,00	

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности технического проекта составит:

$$I_p = 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,1 = 4,45$$

Показатель ресурсоэффективности работы имеет достаточно высокое значение (по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности исследуемого электропривода.

В результате выполнения поставленных задач по данному разделу, можно сделать следующие выводы:

- при планировании технических работ был разработан график занятости для двух исполнителей, составлена ленточная диаграмма Ганта, позволяющая оптимально скоординировать работу исполнителей.
- составление сметы работы позволило оценить первоначальную сумму затрат на реализацию технического проекта.
- оценка ресурсоэффективности проекта, проведенная по интегральному показателю, дала высокий результат (4,45 по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности реализации технического проекта.

Реализация технических решений, предложенных в рамках ВКР позволит увеличить производительность спортивного тренажера, путем улучшения энергоэффективности и энергосбережения при внедрении более универсального оборудования, требующего меньше затрат, связанных с эксплуатацией.

6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

В данной работе проектируется электропривод спортивного тренажера, который состоит из датчика обратной связи - резольвера, синхронного двигателя и контроллера mUSD-220.

Область применения данного проекта не ограничивается. Спортивный тренажер с электроприводом может применяться как в инновационных спортивных учреждениях, которые занимаются сбором данных об общем состоянии спортсменов, так и в домашних условиях любого пользователя.

Рабочее место представляет собой место оператора и включает в себя рабочий стол и персональный компьютер с помощью которого производится управление и настройка технического оборудования.

Работа над техническим проектом выполнялась в помещении, которое находится в аудитории 230, восьмого корпуса Томского Политехнического Университета.

6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Площадь, приходящаяся на одно рабочее место пользователя ПК с монитором на базе плоских дискретных экранов – 4,5 м², что позволяет расположить технические средства на безопасном расстоянии до пользователя.

При компоновки рабочей зоны сотрудника следует учитывать следующие организационные мероприятия [10]:

- Обеспечить необходимый по ширине проход (500 мм) с трех сторон от рабочего стола;
- Рабочее место с ПЭВМ, при работе, вызывающей значительное умственное напряжение, рекомендуется изолировать перегородками от других работников в помещении.

- Конструкция рабочего стола должна позволять осуществить оптимальное расположение необходимых предметов труда и оборудования, согласно требованиям, предъявляемым к рабочему процессу.
- Конструкция рабочего стула должна обеспечивать удобное положение тела человека в момент осуществления работ на рабочем месте. При выполнении длительных работ с ПЭВМ рабочий стул должен обеспечивать возможность изменения позы с целью минимизации статического напряжения в позвоночном отделе опорно-двигательного аппарата.

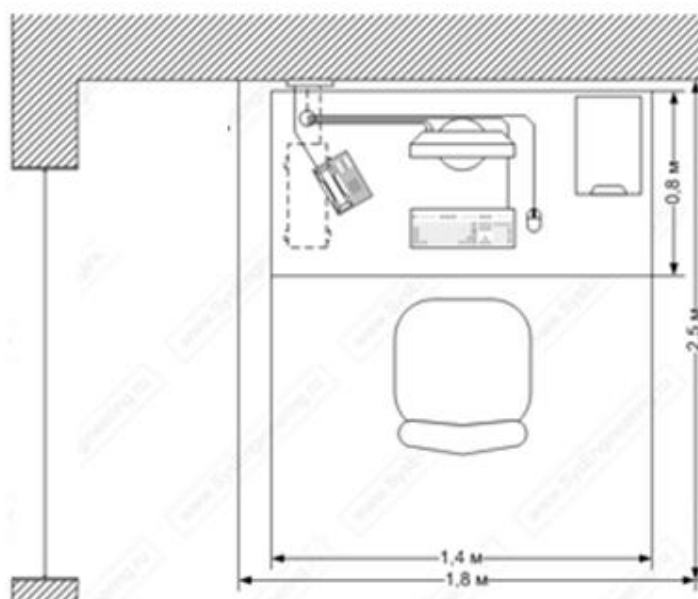


Рисунок 38 - Схема рабочего места.

Вопросы, относящиеся к организации и охране труда при работе за компьютером, регулируются:

- Трудовым кодексом Российской Федерации,
- СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы»,
- Инструкцией по охране труда при работе на ПК,
- ГОСТ 12.1.033-81 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность,

- ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».

6.2. Производственная безопасность

Используя ГОСТ 12.0.003-2015 [11], проводится анализ опасных и вредных факторов, воздействующих на человека при работе с ПК. Перечень выявленных факторов, характерных данному виду работы приведен в таблице 11.

Таблица 11 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разрабо тка	Изготов ление	Эксплуа тация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96 СН 2.2.4/2.1.8.562- 96 СНиП 23-05-95 СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 СанПиН 2.2.4.1329- 03 ГОСТ 12.1.033 – 81
2.Повышенный уровень шума		+	+	
3.Недостаточная освещенность рабочей зоны		+	+	
4. Электромагнитное излучение;	+	+	+	
5. Опасность поражения электрическим током;		+	+	
6. Опасность возникновения пожара;		+	+	

6.2.1 Отклонения показателей микроклимата

Существуют гигиенические требования СанПиН 2.2.4.548-96 [12] к показателям микроклимата рабочих мест с учетом интенсивности энергозатрат работающих, периодов года. Санитарные нормы и правила предназначены для предотвращения неблагоприятного воздействия микроклимата рабочих мест производственных помещений на самочувствие, функциональное состояние, работоспособность и здоровье человека.

Определим необходимые параметры микроклимата и воздушной среды для помещения.

Работа на ПК относится к категории работ 1а [10], к которой относятся работы с интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/ч (до 139 Вт), производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением. Оптимальные параметры микроклимата для этой категории работ приведены в таблице 12:

Таблица 12 – Оптимальные параметры микроклимата по СанПиН 2.2.4.548- 96

Сезон	Температура воздуха, t, °С	Температура поверхностей, t, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный (средне суточная температура меньше 10°С)	22-24	21 - 25	60-40	0.1
Теплый (среднесуточная температура воздуха 10°С и выше)	23-25	22-26	60-40	0.1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в аудитории относятся: в теплое время года для удаления избыточного тепла и влаги используется, в холодное время года вводится система центрального отопления.

В аудитории 230, восьмого корпуса Томского Политехнического Университета, установлен настенный кондиционер для университета, удобная и компактная установка, состоящая из двух рабочих блоков, один из которых крепится на фасад университета, а второй компонент вешается на внутреннюю стену аудитории.

6.2.2 Повышенный уровень шума

Шум – это совокупность различных звуков, возникающих в процессе производства и неблагоприятно воздействующих на организм.

Шум возникает при использовании оборудования, находящегося в аудитории и при воздействии внешних факторов.

Шум неблагоприятно воздействует на организм человека, вызывает психические и физиологические нарушения, снижение слуха, работоспособности,

создают предпосылки для общих и профессиональных заболеваний и производственного травматизма, а также происходит ослабление памяти, внимания, нарушение артериального давления и ритма сердца.

Уровни шума не должны превышать значений, установленных в ГОСТ

12.1.003 – 83 и ГОСТ 17187 – 81 [13].

Меры по борьбе с шумами:

- правильная организация труда и отдыха;
- снижение и ослабление шума;
- применение звукопоглощающих преград;
- применение глушителей шума;
- применение средств индивидуальной защиты от шума.

6.2.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

По требованиям СанПиН 2.4.2.1178-02 общее освещение в аудитории должно составлять 300 люкс. Обеспечить это требование естественным освещением практически невозможно, поэтому должно применяться комбинированное освещение.

Чтобы добиться показателей освещения указанных в СанПиН 2.4.2.1178-02 в рабочей аудитории установлены светильники с люминесцентными лампами и размещены сплошными рядами, параллельными стенам, для достижения равномерной горизонтальной освещенности.

6.2.4 Электромагнитное излучение

Электромагнитные поля оказывают специфическое воздействие на ткани человека, при воздействии полей, имеющих напряженность выше предельно допустимого уровня, развиваются нарушения со стороны нервной, сердечно-сосудистой систем, органов дыхания, органов пищеварения и некоторых

биохимических показателей крови. Источниками электромагнитных излучений являются компьютеры, трансформаторы, сетевое оборудования, источники индукционного тока.

В случаях, указанных в п. 2.1.1 настоящих Санитарных норм и правил, энергетическая экспозиция за рабочий день (рабочую смену) не должна превышать значений, указанных в таблице 13.

Таблица 13 - Предельно допустимые значения энергетической экспозиции

Диапазоны частот	Предельно допустимая энергетическая экспозиция		
	По электрической составляющей, $(В/м)^2 \times ч$	По магнитной составляющей, $(А/м)^2 \times ч$	По плотности потока энергии $(мкВт/см^2) \times ч$
30 кГц - 3 МГц	20000,0	200,0	-
3 - 30 МГц	7000,0	Не разработаны	-
30 - 50 МГц	800,0	0,72	-
50 - 300 МГц	800,0	Не разработаны	-
300 МГц - 300 ГГц	-	-	200,0

6.2.5 Опасность поражения электрическим током

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного для жизни воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества [14].

Опасное и вредное воздействия на людей электрического тока и электрической дуги проявляются в виде электротравм и профессиональных заболеваний.

Помещение, где расположены персональные вычислительные машины, относится к помещениям без повышенной опасности [14], так как отсутствуют следующие факторы:

- сырость;

- токопроводящая пыль;
- токопроводящие полы;
- высокая температура;
- возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землёй металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам и механизмам и металлическим корпусам электрооборудования.

К мероприятиям по предотвращению возможности поражения электрическим током следует отнести [14]:

- при производстве монтажных работ необходимо использовать только исправный инструмент, аттестованный службой КИПиА;
- с целью защиты от поражения электрическим током, возникающим между корпусом приборов и инструментом при пробое сетевого напряжения на корпус, корпуса приборов и инструментов должны быть заземлены;
- при включенном сетевом напряжении работы на задней панели должны быть запрещены;
- все работы по устранению неисправностей должен производить квалифицированный персонал;
- необходимо постоянно следить за исправностью электропроводки.

Перед началом работы следует убедиться в отсутствии свешивающихся со стола или висящих под столом проводов электропитания, в целостности вилки и провода электропитания, в отсутствии видимых повреждений аппаратуры наличия заземления.

Токи статического электричества, наведенные в процессе работы компьютера на корпусах монитора, системного блока и клавиатуры, могут приводить к разрядам при прикосновении к этим элементам. Такие разряды опасности для человека не представляют, но могут привести к выходу из строя компьютера. Для снижения величин токов статического электричества

используются нейтрализаторы, местное и общее увлажнение воздуха, использование покрытия полов с антистатической пропиткой.

В аудитории 230, восьмого корпуса Томского Политехнического Университета, установлены розетки с дополнительным контактом защитного заземления, в соответствии с главой 1.7 правил устройств электроустановок (ПУЭ) все электрические бытовые приборы, имеющие металлический корпус или доступ к другим металлическим элементам конструкции, должны заземляться. Розетки установлены на высоте менее одного метра, что соответствует СНиП 3.05.06-85.

6.2.6 Опасность возникновения пожара

Согласно ГОСТ 12.1.033 – 81 понятие пожарная безопасность означает состояние объекта, при котором с установленной вероятностью исключается возможность возникновения и развития пожара и воздействия на людей опасных факторов пожара, а также обеспечивается защита материальных ценностей.

Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причины возникновения пожара неэлектрического характера:

- а) халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня);
- б) самовоспламенение и самовозгорание веществ.

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

Для устранения причин возникновения пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия [15]:

- а) сотрудники лаборатории должны пройти противопожарный инструктаж;
- б) сотрудники обязаны знать расположение средств пожаротушения и уметь ими пользоваться;

в) необходимо обеспечить правильный тепловой и электрический режим работы оборудования;

г) пожарный инвентарь и первичные средства пожаротушения должны содержаться в исправном состоянии и находиться на видном и легко доступном месте.

6.3. Экологическая безопасность

Необходимо уделять повышенное внимание защиты окружающей среды от ущерба наносимого компьютерным оборудованием. По статистическим данным при создании одного среднестатистического персонального компьютера общий вес различных химикатов и ископаемого топлива в десять раз превышает вес окончательного продукта. Также некоторые токсичные вещества выделяются и в процессе повседневного использования оборудования или при разрушении устройств.

ЖК-экраны - один из источников парниковых газов, которые намного вреднее диоксида углерода. Жидкокристаллические мониторы быстро обрели популярность, придя на смену громоздким ЭЛТ-моделям. И это неудивительно, ведь они обладают тонкими корпусами и потребляют значительно меньше электроэнергии. По другим аспектам экологической безопасности дисплеи на основе жидких кристаллов также считались прорывом, потому что в них не использовался газ, содержащий свинец. Довольно долго никто не обращал внимания на применяемый для чистки ЖК-панелей трехфтористый азот (NF₃), и только в середине 2008 года учеными было доказано наличие данного химического вещества в атмосфере. Открытие было впечатляющим: по сравнению с диоксидом углерода (CO₂) NF₃ является в 17 000 раз более активным парниковым газом, а его атмосферное время полураспада может составлять от 550 до 740 световых лет (у CO₂ - от 30 до 40 лет). Закона, который ограничивал бы уровень выброса NF₃, пока не существует.

Поливинилхлорид, обозначаемый обычно аббревиатурой ПВХ, это разновидность пластика, применяемая в самых разных целях. Из него сделана

внешняя оболочка кабелей, которыми соединяются устройства, он окружает электрический провод портативного компьютера. По словам IT-аналитика «Гринпис» Кейси Харрелла, «ПВХ - худший из пластиков». Поливинилхлорид практически невозможно правильно утилизировать. В результате старый материал оказывается обычно на свалке с отходами или, того хуже, сжигается с целью извлечения медных жил и других ценных компонентов. При его сгорании образуется крайне вредный канцерогенный диоксин. Свалки и химические захоронения загрязняют источники воды. Единственный способ правильно утилизировать ПВХ заключается в том, чтобы отправить его в центр опасных отходов. Радует то, что некоторые технические компании (например, Apple) уже прекратили использовать поливинилхлорид в производстве.

Добывающие производства разрушают поверхность Земли и зачастую загрязняют окружающий воздух и воду. Добыча редкоземельных минералов для производства компьютерной техники невозможна или нерентабельна без использования процессов, которые наносят серьезный вред окружающей среде.

Можно сделать вывод, что снизить вред от компьютерного оборудования следует путем повторного использования усовершенствованного устаревшего оборудования, если это не предоставляется возможным, то путем утилизации отходов в специализированных местах.

6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайные ситуации относятся к совокупности опасных событий или явлений, приводящих к нарушению безопасности жизнедеятельности. К ним относятся: высокие и низкие температуры, физическая нагрузка, поражающие токсичные дозы сильнодействующих ядовитых веществ, высокие дозы облучения, производственные шумы и вибрации и многое другое могут приводить к нарушению жизнедеятельности человека [16].

Основными причинами возникновения чрезвычайных ситуаций являются, во-первых, внутренние, к которым относятся: физический и моральный износ

оборудования, низкая трудовая и технологическая дисциплина, проектно-конструкторские недоработки, сложность технологий, недостаточная квалификация персонала. Во-вторых, внешние чрезвычайные ситуации, это стихийные бедствия, неожиданное прекращение подачи электроэнергии, воды, технологических продуктов, терроризм, войны.

Одним из наиболее вероятных видов ЧС в рабочей аудитории является пожар на рабочем месте.

Причиной возгорания в аудитории могут быть следующие факторы [15]:

- возгорание устройств искусственного освещения.
- возникновение короткого замыкания в электропроводке вследствие неисправности самой проводки или распределительных щитов.
- возгорание устройств вычислительной аппаратуры вследствие нарушения изоляции или неисправности самой аппаратуры;
- возгорание мебели или пола по причине нарушения правил пожарной безопасности, а также неправильного использования дополнительных бытовых электроприборов и электроустановок;

Предотвращение пожара достигается исключением образования горючей среды и источников зажигания, а также поддержанием параметров среды в пределах, исключающих горение.

Для профилактики возникновения пожаров необходимо проводить следующие пожарно-профилактические мероприятия [15]:

- противопожарный инструктаж обслуживающего персонала;
- обучение персонала правилам техники безопасности;
- издание инструкций, плакатов, планов эвакуации.
- соблюдение противопожарных мероприятий при устройстве электропроводок, оборудования, систем отопления, вентиляции и освещения. В кабинете имеется порошковый огнетушитель типа ОП–5 и

находится пожарный щит, установлен рубильник, обесточивающий всю аудиторию, на двери аудитории приведен план эвакуации в случае пожара;

- соблюдение эксплуатационных норм оборудования;
- содержание в исправности изоляции токоведущих проводников.

Так же согласно ГОСТ 12.1.004-91 в аудитории 230, восьмого корпуса Томского Политехнического Университета, установлены автоматические системы пожарной сигнализации и пожаротушения.

Вывод по разделу

В результате выполнения раздела ВКР «Социальная ответственность» были проанализированы вредные и опасные факторы, воздействующие на сотрудника, в момент выполнения его работы. Были предложены основные мероприятия по предупреждению и устранению воздействий пагубных факторов на организм человека. Исходя из вышесказанного в данном разделе, можно прийти к выводу, что, эффективность трудовой деятельности работника зависит от правильной организации рабочего места.

Улучшение условий труда способствуют повышению эффективности и производительности работ сотрудника. Это объясняется тем, что в благоприятных условиях труда снижается вероятность возникновения ЧС, повышается концентрация на объекте производства, из-за нахождения вредных и опасных факторов в допустимых пределах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был спроектирован электропривод спортивного тренажера и настроены параметры регулятора системы регулируемого электропривода. Исследована математическая модель синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, выбран сервоконтроллер и электродвигатель, Разработана структурная схема управления синхронным двигателем, а также были получены переходные характеристики двигателя в различных контурах регулирования.

Проведено имитационное и экспериментальное моделирование переходных процессов в контурах: тока, скорости, позиции. Произведен анализ влияние коэффициентов регуляторов на переходные характеристики электродвигателя.

В экономической части выпускной квалификационной работы исследованы вопросы планирования, определение ресурсосберегающей, финансовой, социальной и экономической эффективности технического проекта, расчет материальных затрат. В разделе безопасности и экологичности проекта, рассмотрены вопросы: техники безопасности, анализ опасных и вредных производственных факторов, пожарная и электробезопасности, рассмотрены мероприятия по охране окружающей среды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. [Электронный ресурс] – Каталог синхронных электродвигателей. – URL: <http://kemz-kaluga.ru/catalog/281> (Дата обращения:10.04.2019г)
2. [Электронный ресурс] – Сервоконтроллеры mUSD. – URL:<http://m-usd.ru/product/> (Дата обращения:12.04.2019г)
3. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электрический привод: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 244 с.
4. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.: ил.
5. Чернышев А.Ю., Дементьев Ю.Н., Чернышев И.А. Электропривод переменного тока: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 213 с.
6. М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В. М. Терехов, А.В. Шинянский Основы автоматизированного электропривода. Учеб. Пособие для вузов. М., «Энергия», 1974. – 568 с.
7. Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Системы управления электроприводов: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2007. – 151 с.
8. И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тихватулина, З.В. Криницина Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно – методическое пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014.-36с .
9. Ю.М. Берёзкин, Д.А. Алексеев Финансовый менеджмент: учебное пособие.– Иркутск : Изд-во БГУЭП, 2012. – 301 с.
10. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы.
11. ГОСТ 12.0.003-2015. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
12. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
13. СНиП II-12-77. Защита от шума

- 14.Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 февраля 2014 г. – М.: КНОРУС, 2014– 488 с.
- 15.СНиП 2.01.02-85. Противопожарные нормы. М.: ГОССТРОЙ СССР, 1991
- 16.ГОСТ Р 22.0.02.-94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий. Введ. 1996-01-01. Текст. М.: Изд-во стандартов, 1994. 16 с.

Приложение А

Полная схема подключения сервоконтроллера mUSD-220

